

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL
AGRÍCOLA EN SANTANDER**

REYNEL DE JESÚS RODRÍGUEZ DE LA VEGA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
POSTGRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2023

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL
AGRÍCOLA EN SANTANDER**

REYNEL DE JESÚS RODRÍGUEZ DE LA VEGA

Tesis presentada como requisito para acceder al título de:
Doctor en Ingeniería Química

Director

PhD Humberto Escalante

Profesor Titular Universidad Industrial de Santander

Co-director

PhD Paola Gauthier-Maradei

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
POSTGRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2023

This page intentionally left blank

Agradecimientos

El trabajo de investigación presentado en este documento ha sido realizado bajo la experta guía del Prof. (PhD) Humberto Escalante y la Prof. (PhD) Paola Maradei. Considero un privilegio haber estado asociado con ellos para llevar a cabo mi formación como Doctor en Ingeniería Química. Me he beneficiado enormemente de sus profundos conocimientos durante numerosas discusiones. Es con profundo sentido de afecto y gratitud que deseo expresarles mis sinceros agradecimientos. Su confianza, paciencia e ilusión son difíciles de superar.

Como autor reconozco la deuda con las autoridades de la Universidad Industrial de Santander y a toda su comunidad por brindar la oportunidad de adelantar el trabajo de investigación. En especial al colectivo de estudiantes, hoy profesionales en ingeniería, que formaron parte de ella y con los cuales me ata el mayor sentido de amistad

Reynel De La Vega
Octubre, 2023

*Sólo tú has despertado en mí el impulso noble
de contemplar el corazón del amplio mundo;
con tu mano me diste entera confianza
que me llevó seguro por todas tempestades.*

*Alimentaste al niño de profundos presagios
y tú lo condujiste por prados fabulosos;
como imagen perfecta de la mujer más tierna
su corazón llevaste a la emoción más alta.*

*¿Qué es lo que me encadena al peso de este mundo?
Mi corazón, mi vida, ¿no serán siempre tuyos?
¿No habrá de protegerme tu amor en esta vida?*

Tabla de Contenido

1. Introducción	16
1.1. Motivación	18
1.2. Departamento de Santander: Generalidades	18
1.2.1. Aspectos Geográficos y Geo-Políticos	19
1.2.2. Aspectos Climáticos y Recursos Hídricos	19
1.2.3. Aspectos Socioculturales e Infraestructura	20
1.3. Estructura de la Tesis	21
Referencias	22
2. Residuos agrícolas: Ruta de conversión biomasa–energía	23
2.1. Introducción	23
2.2. Metodología	25
2.2.1. Etapa 1: Recolección y preparación de muestras	25
2.2.2. Etapa 2: Caracterización fisicoquímica	29
2.2.3. Etapa 3: Análisis de clúster jerárquicos	30
2.2.4. Etapa 4: Modelos de conversión biomasa–energía	31
2.3. Resultados & Discusión	42
2.3.1. Análisis elemental	42
2.3.2. Análisis próximo	47
2.3.3. Análisis estructural	51
2.3.4. Análisis de clúster	54
2.3.5. Modelos RNA	57
2.4. Conclusiones	62
Referencias	63
3. Residuos agrícolas: Potencial regional & red de suministro	74
3.1. Introducción	74

3.2. Metodología	76
3.2.1. Etapa 1: Evaluación del potencial energético	76
3.2.2. Etapa 2: Análisis de accesibilidad geográfica	80
3.2.3. Etapa 3: Diseño de la cadena de suministros	82
3.3. Resultados & Discusión	85
3.3.1. Disponibilidad de los residuos agrícolas	85
3.3.2. Residuos agrícolas para la producción de bio-energía	87
3.3.3. Accesibilidad geográfica en la región de Santander	97
3.3.4. Costos de Transporte	100
3.4. Conclusiones	100
Referencias	102
4. Bioenergía en Santander: Ubicación de plantas de biomasa	105
4.1. Introducción	105
4.2. Descripción del Caso de Estudio	108
4.3. Metodología	109
4.3.1. Etapa 1: Selección de criterios y restricciones	110
4.3.2. Etapa 2: Modelización de criterios de inclusión/exclusión	114
4.3.3. Etapa 3: Análisis Multicriterio AHP Difuso	117
4.4. Resultados y Discusión	122
4.4.1. Disponibilidad del residuo	122
4.4.2. Sitios candidatos y análisis de exclusión	124
4.4.3. Evaluación de sitios candidatos	125
4.4.4. AHP Difuso	126
4.4.5. Análisis de Sensibilidad	127
4.5. Conclusiones	132
Referencias	132
5. Bioenergía en Santander	136
5.1. Introducción	136
5.2. Metodología	140
5.2.1. Etapa 1: Selección de Residuos Agrícolas	140
5.2.2. Etapa 2: Diseño preliminar y análisis técnico-económico	145
5.2.3. Etapa 3: Modelo de evaluación de costos	150
5.3. Resultados	151

5.3.1. Selección de los residuos agrícolas	151
5.3.2. Arquitectura de la cadena de suministro	152
5.3.3. Evaluación económica de los costos de transporte	153
5.3.4. Evaluación Técnico–Económica	162
5.3.5. Conclusiones	166
Referencias	166
A. Datos y gráficos suplementarios del capítulo 2	172
B. Datos y gráficos suplementarios del capítulo 3	176
C. Cartografía I	177
D. Cartografía II	201
E. Cartografía III	225

Lista de Figuras

2.1.	Histograma de la distribución de los resultados del análisis elemental	43
2.2.	Diagrama de fase ternaria de las relaciones molares de carbono+hidrógeno ($C+H$), oxígeno (O) y nitrógeno+azufre ($N+S$) de los residuos agrícolas seleccionados	46
2.3.	Histograma de la distribución de los resultados del análisis próximo	47
2.4.	Diagrama de fase ternaria de las relaciones de ceniza (A), materia volátil (VM) y carbono fijo (FC) de los residuos agrícolas seleccionados	50
2.5.	Histograma de la distribución de los resultados del análisis estructural	51
2.6.	Dendrograma para la identificación de residuos agrícolas idóneos para digestión anaerobia basado en los parámetros descriptores seleccionados.	55
2.7.	Dendrograma para la identificación de residuos agrícolas idóneos para tecnologías de transformación termoquímicas (pirólisis y gasificación) basado en los parámetros descriptores seleccionados.	56
2.8.	Gráfico de paridad que muestra la distribución de los valores experimentales frente a los predichos en los modelos RNA para: a. Digestión Anaerobia, b. Pirólisis, y c. Gasificación	59
3.1.	Aporte al potencial energético por cultivo	93
3.2.	Mapa de la distribución geográfica de los residuos agrícolas en Santander	94
3.3.	Mapa de la distribución geográfica del potencial energético en Santander	95
3.4.	Mapa del análisis de vecindad en un área circular con un radio de 25km	96
3.5.	Mapa de accesibilidad geográfica de Santander	98
3.6.	Mapa de la regionalización del área de estudio por polígonos Thiessen.	99
3.7.	Mapas de los costos de transporte para: a. Raquis de palma y b. Bagazo de caña de panela; utilizando camión de doble ejes ($C2$)	101
4.1.	Principales factores geográficos utilizados en el análisis de idoneidad.	114

4.2.	Estructura jerárquica del problema decisión.	120
4.3.	Residuos del cultivo de cacao: a. Cacota del cacao (PH), b. Residuos de poda (TP), c. Frutos de descarte (RCF)	123
4.4.	a. Mapa de la distribución geográfica de los residuos de cacao en Santander, b. Mapa del análisis de vecindad en un área circular con un radio de 25 km.	124
4.5.	a. Mapa de la red de transporte, los sitios potenciales para una planta de bioenergía y las áreas geográficas restrictivas, b. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de cacao.	128
4.6.	Análisis de sensibilidad de la clasificación individual de los sitios candidatos (BP) según el escenario considerado. El área gris indica la región en la que el índice de idoneidad muestra las mejores ubicaciones.	130
4.7.	Distribución (histograma) del índice de idoneidad obtenido de (a) Caso Base, (b) Caso I: Influencia de la disponibilidad de recursos, (c) Caso II: Influencia del factor económico de transporte y (d) Caso III: Influencia de la viabilidad de la pendiente. El eje X indica la puntuación MCDA difusa, el eje Y representa el número de BP. Los quiebres naturales del caso base fueron usados como referencia para fines de comparación.	131
5.1.	Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de residuos agrícolas	146
5.2.	Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de residuos agrícolas	148
5.3.	Diagrama de flujo del proceso de gasificación de residuos agrícolas	149
5.4.	Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de piña a tratar vía digestión anaerobia	154
5.5.	Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de cogollo de la caña de panela a tratar vía digestión anaerobia	155
5.6.	Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de descarte de cacao a tratar vía digestión anaerobia	156
5.7.	Arquitectura de la cadena de suministro para residuos del bagazo de la caña de azúcar a tratar vía pirólisis	157
5.8.	Arquitectura de la cadena de suministro para residuos del raquis de la palma de aceite a tratar vía pirólisis	158
5.9.	Arquitectura de la cadena de suministro para residuos del vástago del plátano a tratar vía gasificación	159

5.10. Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de cacota del cacao a tratar vía gasificación	160
5.11. Costos de transporte optimizado para la digestión anaerobia de (A) Residuos de poda de piña; (B) Cogollo de la caña de panela; (C) Frutos de descarte del cacao	161
5.12. Costos de transporte optimizado para la pirólisis de (A) Bagazo de la caña de panela; (B) Raquis de la palma de aceite	161
5.13. Costos de transporte optimizado para la gasificación de (A) vástago de plátano; (B) Cacota de cacao	162
A.1. Diagramas de caja y bigotes de las variables descriptoras de la digestión anaerobia en el análisis clúster	173
A.2. Diagramas de caja y bigotes de las variables descriptoras de las tecnologías de transformación termoquímica en el análisis clúster	175
C.1. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Aguacate en Santander . . .	178
C.2. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Arracacha en Santander . .	179
C.3. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Arroz en Santander	180
C.4. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Banano en Santander	181
C.5. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Cacao en Santander	182
C.6. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Café en Santander	183
C.7. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Caña Panelera en Santander	184
C.8. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Cebolla Junca en Santander	185
C.9. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Fique en Santander	186
C.10. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Frijol en Santander	187
C.11. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Guayaba en Santander . . .	188
C.12. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Limón en Santander	189
C.13. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Maíz en Santander	190
C.14. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Mandarina en Santander . .	191
C.15. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Mora en Santander	192
C.16. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Naranja en Santander . . .	193
C.17. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Palma de Aceite en Santander	194
C.18. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Papa en Santander	195
C.19. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Papaya en Santander	196
C.20. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Piña en Santander	197

C.21. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Plátano en Santander	198
C.22. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Tomate en Santander	199
C.23. Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Yuca en Santander	200
D.1. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Aguacate en Santander . .	202
D.2. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Arracacha en Santander .	203
D.3. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Arroz en Santander	204
D.4. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Banano en Santander . . .	205
D.5. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Cacao en Santander	206
D.6. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Café en Santander	207
D.7. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Caña Panelera en Santander	208
D.8. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Cebolla Junca en Santander	209
D.9. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Fique en Santander	210
D.10. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Frijol en Santander	211
D.11. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Guayaba en Santander . .	212
D.12. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Limón en Santander	213
D.13. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Maíz en Santander	214
D.14. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Mandarina en Santander .	215
D.15. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Mora en Santander	216
D.16. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Naranja en Santander . . .	217
D.17. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Palma de Aceite en Santander	218
D.18. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Papa en Santander	219
D.19. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Papaya en Santander . . .	220
D.20. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Piña en Santander	221
D.21. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Plátano en Santander . . .	222
D.22. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Tomate en Santander . . .	223
D.23. Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Yuca en Santander	224
E.1. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Aguacate	226
E.2. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Arracacha	227
E.3. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Arroz	228

E.4. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Banano	229
E.5. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Cacao	230
E.6. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Café	231
E.7. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Caña Panelera	232
E.8. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Cebolla Junca	233
E.9. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Fique	234
E.10. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Frijol	235
E.11. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Guayaba	236
E.12. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Limón	237
E.13. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Maíz	238
E.14. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Mandarina	239
E.15. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Mora	240
E.16. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Naranja	241
E.17. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Palma de Aceite	242
E.18. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Papa	243
E.19. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Papaya	244
E.20. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Piña	245

E.21. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Plátano	246
E.22. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Tomate	247
E.23. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Yuca	248

Lista de Tablas

2.1. Sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa agrícola . .	27
2.2. Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de digestión anaerobia	33
2.3. Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de pirólisis	35
2.4. Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de gasificación	38
2.5. Análisis elemental de los residuos agrícolas representativos	43
2.6. Análisis próximo de los residuos agrícolas representativos	48
2.7. Análisis estructural de los residuos agrícolas representativos	52
2.8. Detalles de la arquitectura y desempeño de los modelos RNA	58
2.9. Predicción del rendimiento a CH_4 del modelo RNA de digestión anaerobia	60
2.10. Predicción del rendimiento a bio-oil de acuerdo al modelo RNA de pirólisis	61
2.11. Predicción del rendimiento a gas de síntesis y su composición de acuerdo al modelo RNA de gasificación	62
3.1. Costos de Transporte según parque automotor	84
3.2. Potencial energético de los principales residuos agrícola de Santander .	88
3.3. Disponibilidad de los principales cultivos agrícolas en Santander y su potencial energético	91
4.1. Clasificación de velocidad de diseño en función de la complejidad de la ruta y la pendiente.	113
4.2. Descripción del conjunto de datos geográficos utilizados para el análisis de exclusión.	115
4.3. Escala lingüística de comparación por par de criterios/alternativas y número triangular difuso asociado.	119

4.4. Criterios y subcriterios en el modelo de decisión.	121
4.5. Residuos de cacao generados y su correspondiente potencial energético .	123
4.6. Escala lingüística y clasificación del residuo del cacao en función de su dispersión.	125
4.7. Preferencias del AHP difuso en matrices de comparación por pares para el nivel de criterios.	127
4.8. Preferencias del AHP difuso en matrices de comparación por pares para el nivel de sub-criterios.	127
4.9. Resultados de análisis de sensibilidad para escenarios de ensayo y caso base	129
5.1. Parámetros de selección del residuo idóneo para digestión anaerobia . .	142
5.2. Parámetros de selección del residuo idóneo para pirólisis	143
5.3. Parámetros de selección del residuo idóneo para gasificación	144
5.4. Resultados del proceso de selección de los residuos agrícolas por el modelo TOPSIS	152
5.5. Rentabilidad de instalaciones de digestión anaerobia para varios tamaños de plantas acorde a los residuos seleccionados.	163
5.6. Rentabilidad de instalaciones de pirólisis para varios tamaños de plantas acorde a los residuos seleccionados.	164
5.7. Rentabilidad de instalaciones de gasificación para varios tamaños de plantas acorde a los residuos seleccionados.	165
A.1. Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el modelo RNA de digestión anaerobia en régimen mesofílico.	172
A.2. Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el modelo RNA de pirólisis en lecho fluidizado.	174
A.3. Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el modelo RNA de gasificación en lecho fluidizado.	174

Resumen

La investigación se centra en el aprovechamiento de los residuos agrícolas en Santander para la producción de bioenergía. Se realiza una caracterización exhaustiva de 68 tipos de residuos, identificando las tecnologías óptimas para su conversión en energía. Además, se construyen modelos matemáticos basados en redes neuronales artificiales (RNA) para predecir y modelar las tecnologías de conversión: digestión anaerobia, pirólisis y gasificación. Se analiza el potencial energético de estos residuos considerando su distribución geográfica, accesibilidad y los costos logísticos y de recolección. Se desarrolla una metodología estratégica para la selección de ubicaciones óptimas de plantas de biomasa, integrando criterios técnicos, socio-económicos y ambientales mediante análisis multicriterio AHP difuso y sistemas de información geográfica (SIG). Finalmente, se implementa un sistema de soporte de decisiones espaciales que evalúa la viabilidad y sostenibilidad de las tecnologías de bioenergía. Este enfoque integral busca maximizar el uso de residuos agrícolas, impulsando una matriz energética sostenible en Santander mediante análisis de escenarios y un aprovechamiento eficiente de los recursos agrícolas para la generación de energía limpia y renovable.

Abstract

The research focuses on the utilization of agricultural residues in Santander for bioenergy production. A comprehensive characterization of 68 types of residues is conducted, identifying optimal technologies for their conversion into energy. Additionally, mathematical models based on Artificial Neural Networks (ANNs) are developed to predict and model conversion technologies: anaerobic digestion, pyrolysis, and gasification. The energy potential of these residues is analyzed considering their geographical distribution, accessibility, and logistical collection costs. A strategic methodology is developed for selecting optimal locations for biomass plants, integrating technical, socio-economic, and environmental criteria using fuzzy Analytical Hierarchy Process (AHP) analysis and Geographic Information Systems (GIS). Finally, a Spatial Decision Support System (SDSS) is implemented to assess the viability and sustainability of bioenergy technologies. This comprehensive approach aims to maximize the utilization of agricultural residues, fostering a sustainable energy matrix in Santander through scenario analysis and efficient utilization of agricultural resources for clean and renewable energy generation.

1

Introducción

La independencia y sostenibilidad energética ha motivado a muchos países a considerar fuentes de energía alternativas, entre ellas, sistemas basados en biomasa. Los residuos agrícolas representan una de las más grandes y diversificadas fuentes a ser explotada como energía renovable. Sin embargo, estos recursos son muy heterogéneos en cuanto a sus propiedades físico-químicas, distribución espacial y costos logísticos asociados; factores identificados como los principales cuellos de botella en el desarrollo de instalaciones de producción de bioenergía. En Colombia, los objetivos y estrategias especificados en el plan energético nacional expresan el interés del país en el aprovechamiento energético de distintas materias primas basadas en biomasa. Colombia, como un país tradicionalmente agrícola, posee un enorme potencial para la producción de biocombustibles de segunda generación a partir del amplio espectro de residuos provenientes de su actividad agrícola.

En orden de explotar el potencial de la biomasa, una de las variables más relevantes para decidir que tecnología adoptar para su transformación energética son las propiedades fisicoquímicas. Mientras, factores como su disponibilidad, ubicación, y los distintos aspectos ambientales, socio-políticos y técnico-económicos llegan a ser variables importantes al momento de la instalación de las plantas para su procesamiento. Así por ejemplo, uno de los inconvenientes comúnmente encontrado es el costo económico asociado con la extracción y el transporte. Se observa que la dispersión geográfica de la biomasa es un factor que afecta la posible ubicación de la plantas de procesamiento, debido a los costos de transporte (Rentizelas and Tatsiopoulos; 2010; Emeksiz and Yüksel; 2022). Así mismo, la biomasa generalmente no está lista para su uso, la heterogeneidad en su naturaleza y forma hacen que sea necesario la adecuación y estandarización.

Por consiguiente, antes de la transformación energética directa, se requiere de una serie previa de tratamientos como: astillado, peletizado, etc.

España ha construido una base de datos con información disponibles sobre la caracterización física y química de más de 200 diferentes muestras de biomasa, permitiendo futuras investigaciones sobre la evaluación de este recurso como fuente energética (García et al.; 2012). Costa Rica, ha elaborado un inventario preliminar de sus recursos de biomasa, presentando a través de material cartográfico clasificaciones generales de densidad y disponibilidad de biomasa acumulada (Iakovou et al.; 2010). En Colombia se han establecido inventarios sobre la disponibilidad, localización, características físico-químicas y potencialidad de las biomasa residuales de ocho cultivos, tres especies animales y los residuos sólidos urbanos de las principales ciudades (Hernández et al.; 2010). Sin embargo, a nivel nacional y regional no se han realizado estudios, sobre el aprovechamiento energético de la biomasa, que involucre los aspectos socio-económicos y ambientales.

La composición química y las propiedades físicas de diferentes residuos agrícolas varían ampliamente de acuerdo a su origen. Este hecho afecta significativamente el funcionamiento de la tecnología de transformación adoptada. Así, para un gasificador, la composición del gas de síntesis y la eficiencia general de la generación de energía depende en gran medida del residuo procesado. Además, dependiendo de las características de la biomasa, el diseño y tipo de gasificador también varía ampliamente. Dada la extensa disponibilidad de biomasa agrícolas en el mundo, surge un reto para la ingeniería y es la definición de la alternativa tecnológica más apropiada para cada residuo. Esto conlleva, ampliar el rango de posibilidades y criterios directamente relacionados con la evaluación de la biomasa como recurso energético y dificulta el proceso relativo a la toma de decisión sobre el mejor escenario para su aprovechamiento energético.

Este panorama, suscita el desarrollo de nuevos proyectos en el campo de la producción energética sostenible a partir de la biomasa residual, además la conformación de empresas especializadas en el sector. Sin embargo, no existen a la fecha estudios que involucren todas las variables (disponibilidad, potencial, características físico-químicas, idoneidad tecnológica, etc.) indispensables para evaluar los diferentes escenarios de aprovechamiento de estos residuos. Para que una región en específico pueda tomar decisión sobre el aprovechamiento energético de un residuo agrícola, se requiere contar con una herramienta de ingeniería que brinde apoyo. Por lo anterior, se deduce que la implementación de estrategias para el aprovechamiento energético de una biomasa con-

lleva el desarrollo de una metodología que sopesa todos los parámetros necesarios para la toma de decisión. La selección de estas pautas puede variar de acuerdo al número de actores involucrados o la cantidad de factores tenidos en cuenta.

1.1. Motivación

Dentro de la planificación energética general, la expresión de los objetivos a escala regional, así como el análisis de las características y necesidades de sus sistemas energéticos, contribuye a alcanzar los objetivos de la planificación energética nacional. Para este fin, debe realizarse una descripción general de la zona considerada y de su entorno, incluyendo los aspectos socio-económicos y técnico-ambientales. Sin embargo, no basta sólo conocer los recursos energéticos de la región sino que se deberá poder calcular el costo de su explotación.

Ahora, la viabilidad y aceptación de las instalaciones de energía renovable son las principales preocupaciones al momento de evaluar los sistemas de biomasa como proyectos económicos. Los costos de inversión están vinculados a la viabilidad del proyecto y representan un obstáculo para nuevos inversionistas, la aceptación de la sociedad de las fuentes de energía renovables como potencial medio para suplir el incremento en la demanda de energía, está relacionada con el concepto de sostenibilidad. El presente proyecto, es un primer intento para consultar a las autoridades regionales sobre cómo lograr una energía más sostenible, mientras que se mantiene un consenso en un entorno de múltiples actores. Para ello se pretende construir un escenario de aprovechamiento energético para Santander a través del estudio de sus biomásas más representativas y las tecnologías disponibles en la actualidad para su conversión.

1.2. Departamento de Santander: Generalidades

En esta sección se pretende una síntesis de la situación ambiental del departamento, bajo un enfoque crítico dirigido a establecer interrelaciones y causalidades entre los elementos ambientales y la intervención humana que ha actuado sobre los mismos. Mediante un breve análisis se pretende identificar las facilidades para aprovechar los recursos de biomasa de forma sustentable, así como las dificultades, retos y oportunidades. En suma, se pretende aproximarse a respuestas válidas del por qué de la elección de la región como un laboratorio espacial donde validar la metodología propuesta.

1.2.1. Aspectos Geográficos y Geo-Políticos

El departamento de Santander, ubicado al noreste de la República de Colombia, presenta una superficie de 30,537 km², constituyéndose uno de los mayores entes territoriales del país. Característica distintiva del departamento es su variado relieve, lo cual determina numerosos paisajes fisiográficos y regiones bioclimáticas. Las alturas sobre el nivel del mar van desde los 100 metros en el valle aluvial del río Magdalena, hasta los 4,270 metros en el páramo de los Santos. En virtud de lo anterior, los factores climatológicos, erosivos, estructurales y antrópicos, y en sí todos ellos integrados, han modelado una de las divisiones político-administrativas del país con mayor complejidad topográfica.

1.2.2. Aspectos Climáticos y Recursos Hídricos

1.2.2.1. El Clima

El medio geográfico del departamento de Santander, caracterizado por grandes contrastes entre sus elementos constitutivos, determina una gran diversidad de climas y microclimas. El relieve es uno de los factores más importantes dentro de la caracterización del clima del departamento. Está conformado por sistemas montañosos que se extienden siguiendo en el rumbo de la cordillera oriental, pero que son interrumpidos por fallas geológicas que originan valles transversales como es el caso del cañón del Chicamocha.

El relieve del departamento ofrece una gran variedad de geoformas y pendientes desde las planas a onduladas del valle del río Magdalena, sobre las cuales descansan innumerables ciénagas y pantanos, hasta las más abruptas de pendientes escarpadas como en la cuenca del río Umpalá. Esta variedad de Relieve incide directamente en los componentes del clima tales como la precipitación, la temperatura, el brillo solar, la humedad relativa, la evaporación y evapotranspiración. El departamento presenta también diferencias de altitud que van desde los 100 m.s.n.m en la región del valle del Magdalena Medio hasta los 4270 m.s.n.m en la región de Páramo.

Contrariamente a ciertas apreciaciones generalizadas, la mayor superficie del departamento presenta un buen régimen de lluvia, caracterizado por una distribución bimodal (dos periodos de mayor precipitación y dos de menos precipitación, alternados durante el año) y una buena cantidad anual. En el piso basal (cálido) la precipitación varía entre 2500 y 3000 mm/año. Sin embargo, la diversidad climática asociada principalmente al

relieve, se expresa en la existencia de 34 unidades bioclimáticas y de 20 zonas de vida, entre las 28 que establece el sistema de L.R. Holdridge. Cerca del 70% del área del departamento presenta suficiente disponibilidad de agua en el suelo, durante la mayor parte del año, la cual es una condición favorable para el desarrollo de la vegetación.

1.2.2.2. Recursos Hídricos

El departamento de Santander se encuentra surcado por una vasta red hidrográfica que fluye principalmente hacia el oeste donde se encuentra el río Magdalena que es la principal arteria departamental y nacional. Las principales corrientes son el río Sogamoso, formado por los ríos Chicamocha y Suárez; el río Fonce que abastece al río Suárez y formado por los ríos Mogoticos, Táquiza y Pienta. El río Lebrija al que fluyen el Cáchira, San Alberto, río de Oro y Suratá. Adicionalmente se tiene otra gran cantidad de corrientes superficiales de menor importancia, pero que son de gran interés regional por el aporte de sus aguas al consumo humano, agricultura, ganadería en incluso sectores industriales.

1.2.3. Aspectos Socioculturales e Infraestructura

1.2.3.1. Caracterización Demográfica

Las proyecciones realizadas con base en el censo de 2005 establecen para el departamento de Santander una población de 2.161 millones de habitantes. Los mayores índices de concentración poblacional corresponden a los municipios sobre el eje vial Bogotá-Bucaramanga, lo cuales a su vez, constituyen los del más amplio periodo de ocupación. Estos municipios, en su gran mayoría, presentan tasas negativas de crecimiento, lo cual es consistente con el progresivo deterioro de los ecosistemas y de la productividad agropecuaria, proceso acelerado por el excesivo fraccionamiento de la propiedad rural.

1.2.3.2. Uso del Suelo: Síntesis Descriptiva

El departamento de Santander posee una amplia gama de usos del suelo los cuales se desarrollan de acuerdo con la posición altitudinal del relieve y las condiciones climáticas. Estos condicionamientos determinan que la localización geográfica de los usos actuales del suelo enmarque regiones con características muy especiales respecto al desarrollo agropecuario. La distribución global de la vegetación y los cultivos se presenta en grandes regiones bien diferenciadas entre sí: La región oriental de características

abruptas, desarrolla la vegetación de páramo y los cultivos transitorios y/o anuales en los límites de los departamentos de Boyacá y Norte de Santander. La región central, se caracteriza por presentar gran variedad de cultivos transitorios, semipermanentes y permanentes y se enmarca geográficamente dentro de las cuencas de los ríos Suarez, Fonce y Chicamocha y la zona media y alta de la cuenca del río Lebrija. La región del valle del Magdalena Medio, que se extiende desde las estribaciones de la cordillera hasta la zona plana del valle.

1.3. Estructura de la Tesis

En el CAPÍTULO 2 se presentan los cultivos representativos del departamento y los residuos que generan estos cultivos. Para cada uno de los residuos agrícolas se determinó mediante análisis elemental su contenido de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S). Por análisis próximo su contenido de humedad (M), carbono fijo (CF), sólidos volátiles (SV) y cenizas (A). Por análisis estructural, su contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina, grasa y proteína. En este sentido, uno de los objetivos del CAPÍTULO 2 fue analizar y comparar la caracterización fisicoquímica de los residuos en orden de identificar la tecnología de conversión más idónea. Esta tarea se realizó mediante análisis de clusters y el desarrollo de modelos matemáticos por redes neuronales artificiales que relacionan las propiedades del residuo y la salida de cada tecnología; digestión anaerobia, pirólisis y gasificación.

En el CAPÍTULO 3 se realiza la evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas y se proporciona información de la distribución geográfica, dispersión espacial y estacionalidad, información base para la construcción de metodologías de evaluación de sitios de instalación de plantas de biomasa. En este capítulo, también se realiza un análisis de accesibilidad geográfica en orden de establecer medidas de conexión que permitan identificar la relación y los vínculos entre dos nodos (localizaciones) específicos; insumo básico para el posterior análisis de redes y de localización.

En el CAPÍTULO 4, el objetivo central es desarrollar una metodología científica y estratégica de toma de decisiones para determinar y clasificar sitios adecuados para la ubicación de plantas de biomasa. Este problema de ubicación se realiza teniendo en cuenta tanto criterios espaciales como no espaciales.

En el CAPÍTULO 5 se realiza la evaluación técnico-económica de las tecnologías de conversión (digestión anaerobia, pirólisis y gasificación). Para este problema primero

se seleccionan los residuos agrícolas más idóneos para cada tecnología, utilizando los resultados de la caracterización fisicoquímica del residuo y los rendimientos de cada tecnología (CAPÍTULO 2), la oferta del residuo y su densidad espacial (CAPÍTULO 3) y el modelo de decisión establecido para identificar la mejor ubicación de una planta de bioenergía (CAPÍTULO 4), para luego establecer la cadena de suministro optimizada y la función de costo total.

Referencias

- Emeksiz, C. and Yüksel, A. (2022). A suitable site selection for sustainable bioenergy production facility by using hybrid multi-criteria decision making approach, case study: Turkey, **315**: 123214.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G. and Bueno, J. L. (2012). Characterization of spanish biomass wastes for energy use, **103**: 249–258.
- Hernández, H. E., Prada, J. O. and Lesmes, H. J. Z. (eds) (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*, [Bogotá]. Includes bibliographical references (p. 172) and index.
- Iakovou, E., Karagiannidis, A., Vlachos, D., Toka, A. and Malamakis, A. (2010). Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis, **30**: 1860–1870.
- Rentizelas, A. A. and Tatsiopoulos, I. P. (2010). Locating a bioenergy facility using a hybrid optimization method, **123**: 196–209.

2

Residuos agrícolas: Ruta de conversión biomasa–energía

En este capítulo se presenta la caracterización fisicoquímica de 68 residuos agrícolas provenientes de los cultivos más representativos de Santander. Los residuos analizados son heterogéneos en su composición, presentando gran variación en su potencial tecnológico. Mediante la identificación de sus propiedades y análisis clúster se indican la ruta tecnológica para su aprovechamiento energético. Se utilizaron redes neuronales artificiales (RNA) como herramientas para predecir y modelizar las tecnologías de transformación. Conceptos esenciales de cara a entender su aplicación específica en los capítulos posteriores.

2.1. Introducción

La diversificación de las fuentes y los proveedores de energía, los impactos ambientales asociados con el uso de combustibles fósiles y las incertidumbres socio–políticas relacionadas con la volatilidad de los mercados internacionales son, hoy día, los principales impulsores de la introducción de fuentes de energías renovables (Dharfizi et al.; 2019; Amin et al.; 2021; Malik et al.; 2020). La biomasa como recurso energético alternativo tiene el potencial de producir una variedad de productos a través de diferentes rutas tecnológicas; incluidos calor, electricidad y biocombustibles sólidos y/o líquidos. Los métodos disponibles para la producción de combustibles energéticos basados en biomasa se pueden dividir en dos categorías principales: rutas termoquímicas y bioquímicas (Jiang et al.; 2012).

En la conversión termoquímica, los compuestos orgánicos de cadena larga presentes en la biomasa se rompen en hidrocarburos de cadena corta, biocombustibles líquidos y gaseosos, por descomposición térmica y/o reformado químico (Abbasi & Abbasi; 2010; Panwar et al.; 2012). Las principales tecnologías de conversión termoquímica incluyen la combustión directa para la producción de calor, posteriormente utilizado en la generación de energía térmica y/o eléctrica, la gasificación para obtener un producto combustible gaseoso conocido como gas de síntesis, y la pirólisis para producir un biocombustible líquido que se utiliza como fuente de energía y como materia prima en biorefinerías (Damartzis & Zabaniotou; 2011). En contraste, la conversión bioquímica de la biomasa implica el uso de bacterias, microorganismos y enzimas para descomponer los polisacáridos lignocelulósicos (celulosa y hemicelulosa) en una corriente de azúcar intermedia para su posterior conversión en combustibles gaseosos o líquidos, como el biogás o el bioetanol (Korres et al.; 2013; Karimi Alavijeh & Yaghmaei; 2016). La conversión bioquímica implica dos procesos principales: la digestión anaeróbica y la fermentación.

La selección de la tecnología de conversión depende de la naturaleza de la materia prima y de la forma en que se requiere la energía (McKendry; 2002). Cada tipo de biomasa tiene una composición química específica, y cada tecnología de conversión tiene requisitos particulares en cuanto a las especificaciones de calidad de la biomasa (Jenkins et al.; 1998; Cardoen et al.; 2015). Por lo tanto, según las características fisicoquímicas, una materia prima específica puede ser excluida o restringida de un tipo específico de procesos de conversión, pero adecuada para otra tecnología (Godin et al.; 2013; Lim & Lam; 2016). De esta manera, y en orden de identificar la ruta de conversión biomasa–tecnología más idónea y proporcionar una comprensión más completa de los principales cuellos de botella, es necesario cuantificar los distintos componentes de la estructura interna de la biomasa, sus particularidades y las relaciones que tienen entre sí, y que afectan la toma de decisiones.

La caracterización de un residuo orgánico se divide en aspectos relacionados con los atributos físicos, químicos y estructurales que afectan, directa o indirectamente, su convertibilidad, eficiencia y economía. En efecto, los resultados del análisis fisicoquímico proporcionan una base cuantitativa común para la comparación de diferentes muestras de biomasa. Sin embargo, establecer una relación entre las características de la biomasa y el rendimiento de cada tecnología es particularmente desafiante dada las complejidades asociadas a los mecanismos, cinéticas y distribución de productos. Como resultado,

distintos trabajos han sido publicados en orden de predecir o simular el comportamiento del sistema sobre la base de modelos matemáticos adecuados (Lauwers et al.; 2013; Xie et al.; 2016; Baruah & Baruah; 2014; Kythreotou et al.; 2014). Como regla, tales modelos consisten de ecuaciones diferenciales y/o algebraicas que hacen posible predecir como determinada variable, evoluciona e interactúa con otras variables. No obstante, la descripción de fenómenos físicos complejos da lugar a modelos matemáticos complejos, a menudo basados en los principios de conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento (Sharma et al.; 2014; Elmaz et al.; 2019; Chavan et al.; 2012).

En contraparte, metodologías basadas en inteligencia artificial (IA) son ampliamente aceptadas como herramientas capaces de enfrentar problemas no lineales en orden de realizar predicciones y generalizaciones de procesos complejos. En la actualidad existe en la literatura especializada una variedad de datos experimentales que permiten construir relaciones estadísticas entre las variables de interés. Modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA) utilizan un enfoque de modelado no físico que correlaciona los datos de entrada y salida para formar un modelo de predicción (Sun et al.; 2016; Baruah et al.; 2017; Nair et al.; 2016; Pandey et al.; 2016; Puig-Arnavat et al.; 2013; Ascher et al.; 2021). Una RNA es representada como un aproximador de función universal que tiene la capacidad de aproximar cualquier función continua a una precisión arbitraria, incluso sin un conocimiento a priori sobre la estructura de la función que se aproxima (Baruah et al.; 2017; Mikulandrić et al.; 2014).

En vista del atractivo de la biomasa como materia prima energética, en este capítulo se busca (1) Estudiar una amplia variedad de residuos agrícolas en orden de presentar su caracterización físico-química; (2) Establecer para cada residuo la ruta biomasa-energía idónea para su aprovechamiento energético en virtud de sus características utilizando análisis clúster y modelos RNA; y (3) Aplicar este conocimiento para identificar una cartera de residuos y tecnologías de conversión apropiadas para la región.

2.2. Metodología

2.2.1. Etapa 1: Recolección y preparación de muestras

La selección de los cultivos más representativos de Santander fue realizada teniendo en cuenta factores como el área cosechada, producción, relevancia socio-económica e interés estratégico regional; estadísticas registradas en el tercer censo nacional agro-

pecuario (DANE; 2014) y en las evaluaciones agropecuarias municipales (EVA) suministradas por la secretaria de agricultura del departamento. Se identificaron a su vez, distintas zonas agroecológicas donde, por las condiciones físicas y ecológicas, así como la cantidad de recursos disponibles y las mejoras técnicas introducidas, pueden llegar a representar regiones idóneas para el desarrollo de laboratorios regionales de bioenergía. Esta tarea fue realizada con la colaboración de distintas asociaciones gremiales y/o pequeños cultivadores, quienes permitieron visitar plantaciones de los cultivos seleccionados, conocer las prácticas agrícolas asociadas a estos cultivos, así como estudiar la disponibilidad y uso actual de los residuos identificados.

Las muestras de biomasa utilizadas en este estudio se recolectaron en estas regiones (unidad de muestreo) de enero a diciembre de 2017 y cada visita fue programada en épocas de producción, corte y/o recolección del producto principal de cada especie agrícola (Tabla 2.1). En la recolección de las muestras se utilizó el protocolo de muestreo establecido por el laboratorio de análisis fisicoquímico del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) para la construcción del atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia (Escalante et al.; 2011). Este protocolo sigue el método de malla, el cual considera las siguientes actividades:

- a. Inspeccionar la plantación o el sitio de almacenamiento de los residuos y dividir el área de muestreo en sectores de acuerdo a las dimensiones del sitio y del número de sub-muestras que se requiera recolectar.
- b. Recolectar muestras en cada uno de estos sectores utilizando el método de muestreo en *zig-zag*. Este método consiste en trazar en la zona a ser muestreada una línea imaginaria en forma de *zig-zag* y recolectar la muestra hasta completar la cantidad necesaria. Entre uno y otro sector considerar un determinado número de pasos como referencia.
- c. Colocar la muestra dentro de bolsas plásticas debidamente identificadas y posteriormente preservarlas con hielo seco para ser trasladadas hasta el laboratorio de análisis.

Todas las muestras se secaron en horno a 105°C para eliminar toda la humedad, luego se molieron finamente para pasar a través de un tamiz de malla 60 ($250\mu\text{m}$). De cada material, se enviaron submuestras duplicadas o triplicadas para su caracterización fisicoquímica.

Tabla 2.1: Sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa agrícola

<i>Cultivo</i> [†]	<i>Nombre científico</i>	<i>Ubicación del sitio de muestreo</i>	<i>Temperatura media anual (°C)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	<i>Precipitación media anual (mm)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Clasificación Köppen–Geiger</i> [‡]	<i>Residuos Identificados</i>
Aguacate	<i>Persea americana</i> Mill	Rionegro (7.301, -73.157)	23.2	73.3	1620	695	AF	Cascara Frutos de descarte Residuos de poda Semillas
Arracacha	<i>Arracacia xanthorrhiza</i>	Los Santos (6.761,-73.090)	20.9	74.0	1092	1482	Aw	Frutos de descarte Rastrojo
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	Rionegro (7.370, -73.178)	23.2	73.3	1620	527	AF	Cacota Frutos de descarte Hojas & Tallos
Cebolla Junca	<i>Allium fistulosum</i>	Enciso (6.668, -72.699)	17.9	82.7	1684	1583	Am	Frutos de descarte Rastrojo
Fique	<i>Furcraea bedinghausii</i>	San Joaquín (6.420, -72.687)	17.9	82.7	2008	2171	CFB	Bagazo
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Piedecuesta (6.970, -73.086)	20.9	74.0	928	896	Aw	Cascara Frutos de descarte Rastrojo
Guayaba	<i>Psidium guajava</i>	Vélez (6.012, -73.650)	20.9	74.0	2240	1828	Cfb	Frutos de descarte Residuos de poda
Limón	<i>Citrus × limon</i>	Rionegro (7.370, -73.178)	23.2	73.3	1620	527	AF	Cascara Residuos de poda
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i>	Rionegro (7.370, -73.178)	23.2	73.3	1620	527	AF	Cascara Residuos de poda
Mora	<i>Rubus glaucus</i>	Piedecuesta (7.007, -73.032)	23.3	73.3	928	1680	Aw	Corona Hojas & Tallos Frutos de descarte
Naranja	<i>Citrus × sinensis</i>	Rionegro (7.370, -73.178)	23.2	73.3	1620	527	AF	Cascara Int. & Ext. Residuos de poda

Tabla 2.1: Sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa agrícola (Continuación)

<i>Cultivo</i> [†]	<i>Nombre científico</i>	<i>Ubicación del sitio de muestreo</i>	<i>Temperatura media anual (°C)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	<i>Precipitación media anual (mm)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Clasificación Köppen-Geiger</i> [‡]	<i>Residuos Identificados</i>
Papa	<i>Solanum tuberosum</i>	Tona (7.214, -72.950)	20.2	78.2	1114	1968	Cfb	Cascara Frutos de descarte Rastrojo
Papaya	<i>Carica papaya</i>	Capitanejo (6.512, 72.686)	17.9	82.7	997	1109	Aw	Cascara & Semillas Frutos de descarte Hojas & Tallos
Piña	<i>Ananas sativus</i>	Lebrija (7.104, -73.195)	23.1	73.3	1280	1139	Af	Cascara & Corazón Frutos de descarte Rastrojo
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>	Zapatoca (6.945, 73.156)	20.9	74.0	1735	896	Am	Frutos de descarte Rastrojo
Yuca	<i>Manihot esculenta</i>	Lebrija (7.101, -73.220)	23.1	73.3	1280	1110	Af	Cascara Frutos de descarte Hojas & Tallos

[†] Los cultivos y residuos asociados al arroz, banano, café, caña de panela, maíz, palma de aceite y plátano publicados en el Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia (Escalante et al.; 2011) fueron también incluidos en el presente estudio.

[‡] La clasificación Köppen-Geiger es un sistema de clasificación de los tipos climáticos. Cada clima está representado por un número variable de letras. La primera letra (“A”, “B”, “C”, “D”, “E”) representa la característica general del clima de una región, siendo el indicador del grupo climático. La segunda letra establece el tipo de clima dentro del grupo, y muestra la cantidad y distribución de las precipitaciones. La tercera letra indica la temperatura media mensual del aire del mes más cálido y la temperatura media anual del aire. Así: Af, clima ecuatorial húmedo; Aw, clima tropical (lluvia en verano); Am, clima tropical monzónico; Cfb, clima marítimo húmedo.

2.2.2. Etapa 2: Caracterización fisicoquímica

2.2.2.1. Análisis Elemental

El análisis elemental o final es una técnica micro analítica que proporciona una base de conocimiento precisa, tanto cualitativa como cuantitativa, sobre la composición elemental de un combustible sólido; carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), oxígeno (O) y trazas de otros elementos. En este estudio, el análisis elemental se realizó de acuerdo a procedimientos estándares establecidos por la ASTM (*American Society for Testing and Materials*), tal y como se describe en: ASTM E777–08 (carbono e hidrógeno), ASTM E778–15 (nitrógeno) y ASTM E775–15 (azufre); la composición de oxígeno se calculó por diferencia. Los resultados de este análisis se expresan en base seca y libre de cenizas.

2.2.2.2. Análisis Próximo

El Análisis próximo o inmediato fue conducido para determinar el contenido de humedad (M), materia volátil (VM), carbono fijo (FC) y ceniza (A) presente en las muestras de biomasa mediante análisis termo-gravimétrico (TGA) según ASTM D7582–15. El método TGA proporciona una metodología para la investigación de los cambios físicos y químicos que tienen lugar durante la descomposición térmica de las muestras de biomasa, dando un registro continuo de su pérdida de peso durante el calentamiento. El análisis de descomposición térmica se llevó a cabo utilizando un equipo TGA 2050 Thermogravimetric Analyzer V5.1A en atmósfera de aire/nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min desde la temperatura ambiente hasta una temperatura final de 800 °C. Cada muestra se analizó al menos tres veces para garantizar la reproducibilidad, utilizando aproximadamente 25mg de cada una. Los resultados están expresados en porcentaje en peso seco de la biomasa.

2.2.2.3. Análisis Estructural

La determinación cuantitativa de la celulosa, hemicelulosa, lignina y los extractos se realizó mediante extracción Soxhlet usando etanol–benceno como disolvente. Antes del análisis, se prepararon las muestras de biomasa lignocelulósica de acuerdo a la norma ASTM E1757–01, que implica las operaciones de molienda y secado. Posteriormente, las muestras se sometieron a procesos de extracción acuosa para eliminar componentes

solubles, tales como galactanos, sustancias pécticas o sales minerales, evitando así la formación de complejos carbohidratos de lignina. Luego, se realizó extracción orgánica para eliminar las resinas, las grasas, los taninos y otras sustancias extractivas que pueden interferir con el análisis. La determinación de los extractivos se realizó usando el procedimiento modificado ASTM D1110–56.

La extracción acuosa se realizó durante seis horas y la velocidad de reflujo del agua destilada se ajustó para proporcionar de cuatro a cinco ciclos por hora. La extracción orgánica se realizó con etanol/tolueno en relación 1:1 como disolvente durante seis horas adicionales. La velocidad de reflujo del etanol/tolueno se ajustó para proporcionar 6–10 ciclos por hora. Los extractivos obtenidos se volatizaron a 40°C usando un evaporador rotatorio para eliminar la mayor parte del disolvente, y se secaron en un horno de vacío a 35°C por 24 horas. Los extractos secos se almacenaron a -20 °C hasta su análisis. Después de la extracción, el sólido restante se transfirió a una placa de *Petri* y se dejó secar al aire durante dos días.

A partir de las muestras de biomasa libre de extractos, la holocelulosa se cuantificó mediante su tratamiento con clorito de sodio de acuerdo con la norma ASTM D–1104. Para una determinación adecuada de la holocelulosa, la cloración debería ser suficiente para eliminar la lignina pero no excesiva para evitar la pérdida de carbohidratos. Por lo tanto, el grado de cloración debe reducirse al mínimo para que la muestra siga siendo amarillenta (Rabemanolontsoa & Saka; 2012). A partir de la fracción seca de holocelulosa, la cantidad de celulosa se determina por tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (NaOH) en ataques consecutivos de acuerdo con la norma ASTM D–1103. Entonces, la hemicelulosa se puede calcular a partir de la diferencia entre el contenido de holocelulosa y celulosa. Finalmente, la lignina en muestras de biomasa libre de extracción se determinó de acuerdo con el método de Klason, en el que las muestras se someten a un proceso de hidrólisis ácida en dos etapas como se describe en ASTM D1106–96.

2.2.3. Etapa 3: Análisis de clúster jerárquicos

Un análisis de clúster fue usado para descubrir agrupamientos (clúster) de residuos agrícolas con una caracterización fisicoquímica (propiedades) similar. Para evitar cualquier distorsión de los resultados debido al amplio rango en la composición de la biomasa, cada propiedad se normalizó en un rango entre cero y uno. La tendencia de agrupación del conjunto de datos (D) fue evaluado mediante el estadístico de Hopkins (H). Así, si el valor de este estadístico es cercano a cero, entonces se puede rechazar

la hipótesis nula y concluir que el conjunto de datos D es significativamente un dato agrupable (es decir, contiene grupos significativos); de lo contrario el conjunto de datos D se distribuye uniformemente.

Para determinar el número óptimo de clúster, se utilizaron tres métodos: Elbow, Silhouette y el índice Dunn (DI), todos estos métodos tienen como objetivo identificar agrupaciones densas y bien separadas entre sí, esto es reducir la distancia de separación entre elementos intra-cluster y maximizar la distancia entre elementos externos. Para el cálculo de la distancia se utilizó el método basado en correlación de Pearson. La correlación de Pearson es el método más utilizado y considera que dos objetos son similares si sus características están altamente correlacionadas, aunque los valores observados pueden estar muy separados en términos de distancia euclidiana.

Finalmente, se realiza el agrupamiento jerárquico (análisis de cluster jerárquico) mediante el método de Ward que utiliza criterio de varianza mínima para vincular cada elemento del conjunto de datos en una rama del árbol de agrupamiento (dendograma). El coeficiente de correlación copenética fue utilizado para medir la calidad de la agrupación generada. Cuanto más cercano sea el valor del coeficiente de correlación copenética a 1, más exactamente la solución de agrupación refleja sus datos; valores superiores a 0.75 se consideran buenos. Este análisis fue ejecutado en el paquete estadístico R.

2.2.4. Etapa 4: Modelos de conversión biomasa-energía

Una red neuronal artificial (RNA) es un modelo computacional de inspiración biológica que imita el comportamiento y el proceso de aprendizaje del cerebro humano. El modelo se basa en la construcción de un sistema interconectado de elementos, nodos o unidades de procesamientos comúnmente referidos como neuronas que permiten establecer relaciones no lineales entre las variables de entrada y salida. En este estudio, el diseño y desarrollo de los modelos de conversión biomasa-energía se realizó a partir de modelos RNA siguiendo un enfoque sistémico de tres pasos a saber: (1) selección y recopilación de datos, (2) configuración de la arquitectura de las redes neuronales y (3) evaluación de la capacidad de predicción y validación de la red.

2.2.4.1. Selección y recopilación de los datos

El primer paso para la construcción de un modelo RNA, y en general cualquier modelo de regresión, es la recopilación y preparación de los datos. El conocimiento

previo que se utiliza e incorpora a una red neuronal determina no solo su capacidad de predicción y generalización, sino también el peso relativo de los predictores del modelo. Por lo tanto, solo se puede ser tan preciso como los datos que se utilizan para entrenar la red. En este sentido, los datos deben: (a.) cubrir el rango de entradas para los cuales se utilizará la red y estar estadísticamente bien distribuidos, (b.) ser homogéneos en cuanto a la calidad y las condiciones experimentales y (c.) asegurar la normalidad e independencia en términos de error (hipótesis de independencia).

Una vez que se ha realizado la recopilación de los datos, se realizan cuatro procedimientos de pre-procesamiento con el objetivo de capacitar la red de manera más eficiente y garantizar la homogeneidad de los datos: (1) completar los datos faltantes, (2) eliminar observaciones atípicas (outlier), (3) normalizar y (4) distribuir los datos en subconjuntos de forma aleatoria. Los datos faltantes fueron completados de acuerdo a su naturaleza, sea por la utilización de correlaciones experimentales, por cálculos realizados con la información disponible en el artículo de referencia o por último, imputados mediante la construcción de un algoritmo de esperanza-maximización, siempre y cuando los datos faltantes constituyan menos del 5 %.

La detección y eliminación de los datos anómalos y el ruido fue realizada mediante la determinación del factor de atipicidad local, abreviado LOF (por sus siglas en inglés, Local Outlier Factor), que es capaz de identificar outliers a partir de la búsqueda de diferencias significativas entre la densidad de un dato y la de sus vecinos. El procedimiento de normalización de los datos es una práctica estándar, ya que diferencias entre la magnitud de las variables puede confundir al algoritmo de aprendizaje sobre la importancia de cada una de ellas y puede forzarlo a rechazar finalmente la variable con la menor magnitud. Al finalizar esta etapa, el conjunto de datos es dividido de forma aleatoria en tres subconjuntos, entrenamiento (70 %), ensayo (15 %) y validación (15 %).

Datos de información experimental en la literatura durante un período de 15 años (2002–2017) se recopilaron y clasificaron para la construcción de las distintas base de datos; Digestión Anaerobia (Tabla 2.2), Pirólisis (Tabla 2.3) y Gasificación (Tabla 2.4). Esta etapa es particularmente importante debido a que la ANN detecta la interrelación estadística entre un conjunto de parámetros de entrada y salida. Dicha base de datos contiene información relativa al análisis físico-químico de todos los tipos de biomasa lignocelulósica; en especial residuos agrícolas.

Tabla 2.2: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de digestión anaerobia

<i>Sustrato</i>	<i>Digestor/ Condiciones de operación</i>	<i>Inóculo</i>	<i>Duración del ensayo (días)</i>	<i>Rendimiento de metano (m³ kg⁻¹ VS)</i>	<i>Referencia</i>
Variedades de maiz	Digestor batch, Mesofílico a 38°C, 0.5–3.0mm	Lodos de plantas de biogás de cultivos energéticos.	70–80	0.268–0.366	Amon et al. (2007)
Biomasa agroindustrial	Digestor batch 2000mL, Mesofílico a 40°C, 50–100mm	Lodo digerido, proveniente de una planta de co-digestión	40	0.098–0.501	Dinuccio et al. (2010)
Residuos de arroz	Digestor batch 2000mL, Mesofílico a 37°C, 3–5mm	Inóculos mesófilos y termófilos frescos	36	0.019–0.226	Contreras et al. (2012)
Biomasa lignocelulósica	Digestor batch 1000mL, Mesofílico a 35°C, 20–50mm	Material digerido de una planta de biogás y fluido ruminal	30	0.220–0.360	Jagadabhi et al. (2011)
Cultivos energéticos	Digestor batch 1100mL, Mesofílico a 37°C, 5–15mm	Lodos recogidos de plantas de biogás	90	0.271–0.439	Triolo et al. (2011)
Cacota cacao	Digestor batch, Mesofílico a 35°C	Estiércol de cerdo y fluido ruminal	15	0.034–0.247	Ward-Doria et al. (2016)
Tallos de tabaco	Digestor batch, Mesofílico a 35°C	Lodos recogidos de ensayos de DA	44	0.133	Liu et al. (2015)
Residuos de papa	Digestor batch, Mesofílico a 35°C, 0.5mm	Consortios anaerobios mixtos	48	0.239	Jacob & Banerjee (2016)
Cascara de cítricos	Digestor batch 500mL, Mesofílico a 35°C	Lodos de aguas residuales digeridos	30	0.166	Fagbohunge et al. (2016)
Vastago de banano	Digestor batch 500mL, Mesofílico a 37°C, 5–20mm	Lodo digerido, recolectado de una planta de biogás mesófila que trata residuos de papa y lodos de depuración.	34	0.289–0.347	Li et al. (2016)

Tabla 2.2: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de digestión anaerobia (continuación)

<i>Sustrato</i>	<i>Digestor/ Condiciones de operación</i>	<i>Inóculo</i>	<i>Duración del ensayo (días)</i>	<i>Rendimiento de metano (m³ kg⁻¹ VS)</i>	<i>Referencia</i>
Bagazo de fique	Digestor batch 500mL, Mesofílico a 39°C	Fluido ruminal y lodos de estiércol de cerdo	15	0.450	Escalante H et al. (2014)
Residuos cáscara de papa	Digestor batch 1000mL, Mesofílico a 35°C, 50–100mm	Lodo digerido, recolectado de una planta DA	40	0.239	Liang & McDonald (2015)
Residuo de papa y hojas de remolacha	Digestor batch 500mL, Mesofílico a 37°C	Lodos de aguas residuales digeridos anaeróbicamente	50	0.072–0.321	Parawira et al. (2004)
Cultivos energéticos	Digestor batch 1000mL, Mesofílico a 37°C, less than 1mm	Lodo digerido, recogido del reactor anaeróbico de una planta de tratamiento de aguas residuales	77	0.309–0.349	Alaru et al. (2011)
Tallos de algodón	Digestor batch 500mL, Mesofílico a 35°C	Mezclas de lodos obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales	45	0.064–0.106	Cheng & Zhong (2014)
Residuos de fibra de sisal	Digestor batch 600mL, Mesofílico a 33°C, 10mm	Lodo de aguas residuales de sisal	65	0.203	Galí et al. (2009)
Reed canary	Digestor batch 1000mL, Mesofílico a 35°C	–	42	0.120–0.406	Oleszek et al. (2014)
Paja de trigo	Digestor batch, Mesofílico a 35°C	Material digerido obtenido a partir de reactores mesófilos	96	0.300–0.303	Xavier et al. (2015)

Tabla 2.3: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de pirólisis

<i>Residuo/ Tamaño medio</i>	<i>Reactor/ Material del lecho</i>	<i>Agente fluidizante</i>	<i>Temp. (°C)</i>	<i>Bio-oil (wt %)</i>	<i>Char (wt %)</i>	<i>Gas (wt %)</i>	<i>Referencia</i>
Miscanthus sinensis 1000–2000 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 100mm; L, 300mm Sand (d_P , 100–300 μmm)	Nitrógeno 30L/min	400–550	46.0–50.1	19.1–28.3	25.7–34.8	Bok et al. (2013)
Biomasa lignocelulósica 250–2000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 75mm; L, 680mm Sand (AFS 45 fused silica)	Nitrógeno 40L/min	500	51.1–66.9	8.8–22.5	10.6–29.0	Carrier et al. (2013)
Cuesco de palma 75–750 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 300mm Silica sand (d_P , 256 μmm)	Nitrógeno	400–600	22.0–58.2	24.6–37.6	15.7–53.0	Islam et al. (1999)
Raquis de palma 150–500 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 40mm; L, 260mm Sand (d_P , 355–500 μmm)	Nitrógeno 3.5–7.0L/min	400–600	46.0–56.5	23.5–28.4	18.5–30.5	Abdullah et al. (2010)
Semilla de cereza 2000 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 40mm; L, 300mm Silica sand	Nitrógeno	400–600	47.0–60.0	16.0–32.0	14.0–37.0	Duman et al. (2011)
Residuos arroz <500 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 37mm; L, 400mm Silica sand ($SiO_2 > 99\%$) (d_P , 450–550 μmm)	Nitrógeno 15L/min	350–500	31.0–56.0	13.0–22.0	25.0–56.0	Eom et al. (2013)
Cascarilla de arroz \sim 850 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 80mm; L, 300mm Emery, Al_2O_3 (d_P , \sim 40 μmm)	Nitrógeno 3.0–5.0L/min	400–550	33.2–49.1	29.4–34.0	17.4–37.5	Heo et al. (2010)
Paja de arroz & aserrín de bambú 600–10000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 80mm; L, 300mm Quartz sand (d_P , \sim 400 μm)	Nitrógeno 38.3–43.3L/min	414/471	51.0–64.0	22.5–27.0	13.5–22.0	Jung et al. (2008)
Pino radiata 1000–1500 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 154mm; L, 616mm Quartz sand (d_P , 400 μmm)	Nitrógeno 66.7–83.3L/min	474–661	24.2–67.1	8.7–11.9	23.2–66.7	Kang et al. (2006)

Tabla 2.3: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de pirólisis (continuación)

<i>Residuo/ Tamaño medio</i>	<i>Reactor/ Material del lecho</i>	<i>Agente fluidizante</i>	<i>Temp. (°C)</i>	<i>Bio-oil (wt %)</i>	<i>Char (wt %)</i>	<i>Gas (wt %)</i>	<i>Referencia</i>
Cuesco de palma 640–930 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 110mm; L, 390mm Quartz sand (d_P , 400 μmm)	Nitrógeno 60–69L/min	435–533	24.0–49.0	20.0–39.0	20.0–39.0	Kim et al. (2010)
Semillas de Amazon tucumã <2000 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 76mm; L, 580mm Silica sand (d_P , 128 μmm)	Nitrógeno 4.0–5.0L/min	400–600	40.0–57.0	9.0–32.0	28.0–40.0	Lira et al. (2013)
Residuos de yuca 355–500 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 38mm; L, 300mm Sand (d_P , 355–500 μmm)	Nitrógeno 5.0–7.0L/min	437–537	61.7–68.4	19.5–24.6	10.5–16.6	Pattiya (2011)
Cuesco de palma 150–500 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 40mm; L, 260mm Sand (d_P , 355–500 μm)	Nitrógeno 3.5–7.0L/min	400–600	46.3–56.5	21.9–28.9	18.5–31.6	Sulaiman & Abdullah (2011)
Residuos de Jatropha 125–1400 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 102mm; L, 970mm Carburo de silicio (d_P , 190 μmm); Zirconia no catalítica (d_P , 187.5 μmm);	Nitrógeno	390–510	37.0–54.0	19.9–31.7	17.1–42.1	Kim et al. (2013)
Residuos agrícolas <1000 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 40mm; L, 300mm Silica sand (d_P , 450 μm)	Nitrógeno	500	41.0–47.0	20.0–23.0	30.0–39.0	Yanik et al. (2007)
Mezcla (1:1) abeto Douglas/café mol. 852–2000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 100mm; L, 400mm Sand (d_P , 780 μm)	Nitrógeno 20–30L/min	400–600	27.3–54.2	14.7–47.0	21.7–34.7	Soysa et al. (2015)
Abeto Douglas/ Cáscarilla de té <2000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 100mm; L, 450mm Silica sand (d_P , 350 μm)	Nitrógeno 45–105L/min	400–600	48.3–63.5	11.0–18.4	24.5–37.8	Wu et al. (2016)
Quercus Acutissima 375–1850 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 76mm; L, 800mm Alumina (d_P , 40 μm)	Nitrógeno	300–550	24.9–54.1	19.9–37.7	14.1–51.8	Lee et al. (2008)

Tabla 2.3: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de pirólisis (continuación)

<i>Residuo/ Tamaño medio</i>	<i>Reactor/ Material del lecho</i>	<i>Agente fluidizante</i>	<i>Temp. (°C)</i>	<i>Bio-oil (wt %)</i>	<i>Char (wt %)</i>	<i>Gas (wt %)</i>	<i>Referencia</i>
Tallos de yuca 250–425 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 450mm Sílica (d_P , 250–425 μm)	Nitrógeno 7.0L/min	400–550	56.6–61.5	22.4–30.6	11.8–21.0	Pattiya & Suttibak (2012)
Alerce japonés 300–1000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 80mm; L, 300mm Emery (d_P , 40 μm)	Nitrógeno 2.0–4.0L/min	400–550	39.7–59.2	17.3–28.4	20.5–43.1	Park et al. (2008)
Pino radiata 300–1000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 80mm; L, 300mm Emery (d_P , 40 μm)	Nitrógeno 2.0–4.0L/min	400–550	42.3–55.4	15.4–28.3	20.6–42.3	Park et al. (2008)
Roble blanco 300–1000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 80mm; L, 300mm Emery (d_P , 40 μm)	Nitrógeno 2.0–4.0L/min	400–550	40.8–53.3	16.6–29.7	22.3–42.6	Park et al. (2009)
Mazorca maíz 750–3500 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 300mm; L, 400mm Quartz sand (d_P , 200–300 μm)	Nitrógeno 1.2–4.5L/min	400–700	51.1–61.3	21.1–36.2	12.8–22.3	Zhang et al. (2009)
Cáscara maní <1000 μm	Reactor lecho burbujeante ϕ , 81mm; L, 600mm Sílica (d_P , 250–550 μm)	Nitrógeno 3.0–4.4L/min	470–550	42.7–60.4	12.5–25.5	21.6–44.6	Zhang et al. (2011)
Aserrín de pino <1000 μm	Reactor lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 450mm Sílica (d_P , 250–550 μm)	Nitrógeno 7.0L/min	415–507	52.0–66.5	8.8–28.1	19.9–33.9	Suttibak et al. (2015)

Tabla 2.4: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de gasificación

<i>Residuo/ Tamaño medio</i>	<i>Reactor/ Material del lecho</i>	<i>Agente fluidizante</i>	<i>Temp. (° C)</i>	<i>LHV (MJ/Nm³)</i>	<i>Rend. gas (Nm³/kg)</i>	<i>Referencia</i>
Biomasa lignocelulósica 380–1490 μ m	Lecho fluidizado circulante ϕ , 100mm; L, 6500mm Cenizas recolectadas de una corrida previa con arena de sílice	Aire 40–65Nm ³ /h	700–850	2.75–4.82	2.13–3.10	Li et al. (2004)
Aserrín de pino 200–900 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 40mm; L, 1400mm Silica sand (d_P , 200–300 μ mm)	Aire 0.5m ³ /h	700–900	6.74–9.14	1.46–2.57	Lv et al. (2003)
Biomasa lignocelulósica 75–3000 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 32–20mm; L, 2500mm Silica sand (d_P , 200–300 μ mm)	Aire	750–880	4.23–4.54	2.32–2.64	Subramanian et al. (2011)
Raquis de palma 2000–6000 μ m	Lecho fluidizado burbujeante ϕ , 150mm; L, 1050mm Silica sand (d_P , 600 μ mm)	Aire	650–1050	3,23–5.87	1.19–2.02	Lahijani & Zainal (2011)
Pellets de madera 600 μ m	Lecho fluidizado burbujeante ϕ , 150mm; L, 1400mm Ófita & piedra caliza (d_P , 380 μ mm)	Aire 5.6–17Nm ³ /h Oxigeno 0–3.7Nm ³ /h	755–840	4.76–9.28	0.96–1.14	Campoy et al. (2009)
Biomasa lignocelulósica 1250–2000 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 70mm; L, 500mm Sand	Vapor	700–900	1.42–1.85	0.77–1.16	Franco et al. (2003)
Madera de caucho Less than 10mm	Lecho fluidizado burbujeante ϕ , 300mm; L, 2500mm Silica sand (d_P , 212–500 μ m)	Aire	700–760	4.10–14.80	1.82–2.42	Kaewluan & Pipatmanomai (2011)
Cascara de citricos 400–1000 μ m	Lecho fluidizado Bed: ϕ , 27mm; L, 475mm Freeboard: ϕ , 52mm; L, 295mm Silica sand (d_P , 400–600 μ m)	Aire/Vapor	700–850	3.62–5.27	2.00–2.52	(Prestipino et al.; 2017)
Cascarilla de arroz	Lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 1200mm Silica sand (d_P , 334 μ m)	Vapor	650–770	11.09–12.21	1.03–1.21	Karmakar & Datta (2011)

Tabla 2.4: Estudios experimentales utilizados en las construcción del modelo de red neuronal artificial de gasificación (continuación)

<i>Residuo/ Tamaño medio</i>	<i>Reactor/ Material del lecho</i>	<i>Agente fluidizante</i>	<i>Temp. (°C)</i>	<i>LHV (MJ/Nm³)</i>	<i>Rend. gas (Nm³/kg)</i>	<i>Referencia</i>
Cascarilla de arroz	Lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 1200mm Silica sand (d_P , 516 μ m)	Aire/Vapor	750–850	3.38–4.26	1.92–2.34	Loha et al. (2013)
Aserrín RDF \sim 100–200 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 1400mm Dolomita (d_P , 170 μ m)	Aire/Vapor	650–770	7.30–8.48	0.86–1.14	Fu et al. (2014)
Cascaras de cacahuete 1000–2675 μ m	Lecho fluidizado burbujeante ϕ , 108mm; L, 1500mm Silica sand (d_P , 516 μ m)	Aire/Vapor	600–900	5.70–6.59	1.63–2.58	Natarajan & Sethupathy (2015)
Pellets de alfalfa & paja de trigo \sim 600–800 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 40mm; L, 1500mm Silica sand (d_P , \sim 367 μ m)	Aire	\sim 850	3.17–4.26	0.99–1.75	Sarker et al. (2015)
Residuos de girasol y jatropha	Lecho fluidizado circulante ϕ , 78mm; L, 6000mm Olivina (d_P , 350–500 μ m)	Aire	750–800	2.46–2.60	2.24–2.31	Christodoulou et al. (2014)
Aserrín de bambú \sim 180 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 50mm; L, 2000mm Silica sand (d_P , 45 μ m)	Aire/Vapor	600	1.64–2.53	1.91–2.94	Wongsiriamnuay et al. (2013)
Aserrín de madera \sim 2500 μ m	Lecho fluidizado ϕ , 100mm; L, 1200mm Sand (d_P , 110 μ m)	Aire	860–890	2.93–5.05	2.65–4.17	Cao et al. (2006)

2.2.4.2. Configuración de la arquitectura de las redes neuronales

Una vez recopilados los datos, el siguiente paso para entrenar una red es configurar su arquitectura. En esta etapa se especifica el número de capas ocultas, las neuronas en cada capa, la función de transferencia, y en general toda las variables que nos permitan definir su geometría y desempeño. El número de nodos en la capa de entrada es igual a la longitud del vector de variables descriptoras. Del mismo modo, el tamaño de la capa de salida está fijado por el número de variables de respuesta. Sin embargo, el número de capas ocultas y el número de nodos en cada capa son parámetros ajustables, cuyas magnitudes dependen de la compensación deseada entre la precisión de la predicción y la capacidad de generalización. Aumentar el número de neuronas en la capa oculta aumenta el poder de la red, pero requiere más cómputo y es más probable que se produzca problemas de sobreajuste (overfitting). Una capa oculta generalmente produce excelentes resultados, no obstante, también es posible probar con capas ocultas adicionales, si los resultados no son adecuados.

En búsqueda de determinar la mejor combinación de algoritmos de aprendizaje, funciones de transferencia en la capa oculta y la capa salida del modelo, se utilizaron tres tipos de algoritmos de retro-propagación, cuasi-Newton, Levenberg–Marquardt y Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS) para entrenar la red. Funciones logarítmica sigmoidea (Logsig) y tangente sigmoidal (Tansig) fueron utilizadas como funciones de activación. Funciones sigmoidales lineales, logarítmicas y tangentes fueron utilizadas como función de salida.

Para evaluar el desempeño de cada uno de los modelos RNA desarrollado, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), calculado mediante la formula

$$R^2 = \sum_{i=1}^N (y_{i,p} - y_a)^2 \times \left[\sum_{i=1}^N (y_{i,e} - y_a) \right]^{-1} \quad (2.1)$$

donde $y_{i,p}$ es el valor calculado por el modelo, $y_{i,e}$ el valor experimental, y_a la media de los valores experimentales, y N denota el número de observaciones.

2.2.4.3. Algoritmo de selección de residuos

La selección de los residuos disponibles para cada una de las tecnologías de transformación se realizó a través de técnicas de clasificación por algoritmos de detección de anomalías o novedades para discriminar entre nuevos casos; a partir de:

1. A partir de las variables descriptoras (x_j) referentes a las especificaciones del residuo agrícola en el conjunto de datos utilizados en la construcción de los modelos RNA, establecer los parámetros de ajustes de la distribución gaussiana; media μ_j y varianza σ_j :

$$\mu_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_j^{[i]} \quad (2.2)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_j^{[i]} - \mu_j)^2 \quad (2.3)$$

2. La distribución gaussiana se obtiene mediante la siguiente ecuación, donde $P(x)$ es la función de densidad de probabilidad :

$$\begin{aligned} P(x) &= P(x_1 | \mu_1, \sigma_1^2) \cdot P(x_2 | \mu_2, \sigma_2^2) \cdots P(x_n | \mu_n, \sigma_n^2) \\ &= \prod_{j=1}^n P(x_j | \mu_j, \sigma_j^2) = \prod_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2} \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

3. Cuando se calculan los parámetros gaussianos, el algoritmo investiga qué ejemplos tienen una probabilidad muy alta y baja dada esta distribución. Es más probable que las características de baja probabilidad sean anomalías en el conjunto de datos. Así, un criterio de selección sería:

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{si } P(x_{Test}) < \varepsilon \text{ (Anómalo)} \\ 0 & \text{si } P(x_{Test}) \geq \varepsilon \text{ (Normal)} \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3. Resultados & Discusión

Los resultados de este capítulo se dividen en dos partes. La primera parte discute los resultados de la caracterización fisicoquímica: Análisis elemental, próximo y estructural. Mientras que en la segunda parte se presentan los resultados del análisis de cluster y de los modelos RNA.

2.3.1. Análisis elemental

Los datos obtenidos del análisis elemental por cada muestra de residuo agrícola en estudio se presentan en la Tabla 2.5. El contenido de carbono (*C*), hidrógeno (*H*) y oxígeno (*O*), como principales componentes de la biomasa, determinan la eficiencia de la conversión y la composición del producto.

De los resultados del estudio de caracterización, se infiere que las muestras de biomasa son heterogéneas en términos de su composición elemental. El carbono (31.56–87.44 %) y el oxígeno (1.96–63.14 %) presentan variaciones significativas entre las diferentes muestras y están presentes en mayor proporción en gran parte de los residuos (Figura 2.1). Ambos componentes se correlacionan con el valor calorífico de la biomasa y son esenciales para el desempeño técnico deseado de un residuo particular. Algunas de las muestras de biomasa, como las frutas de rechazo de cultivos de arracacha y piña, mostraron los mayores contenidos de carbono (> 70 %), valores incluso muy cercanos a los reportados para combustibles fósiles convencionales. Por otro lado, residuos como el vástago y el raquis del plátano presentan un contenido de oxígeno superior al 58 % en peso, lo que generalmente implica una baja densidad de energía. En términos generales, entre el 30–40 % de la materia seca en la biomasa es oxígeno, lo que no está alejado de los resultados presentados en este estudio.

En relación al contenido de hidrógeno, las muestras de biomasa varían en un rango de 3.64 a 10.05 %, con un valor promedio entre muestras cercano al 6 % (Figura 2.1). Un alto contenido de hidrógeno en los residuos agrícolas u otras fuentes de biomasa fomenta la producción de biocombustibles líquidos. Esto se debe a que el hidrógeno en la biomasa la hace generalmente más reactiva; desafortunadamente, este componente en los residuos agrícolas es limitado en comparación con otros combustibles fósiles convencionales.

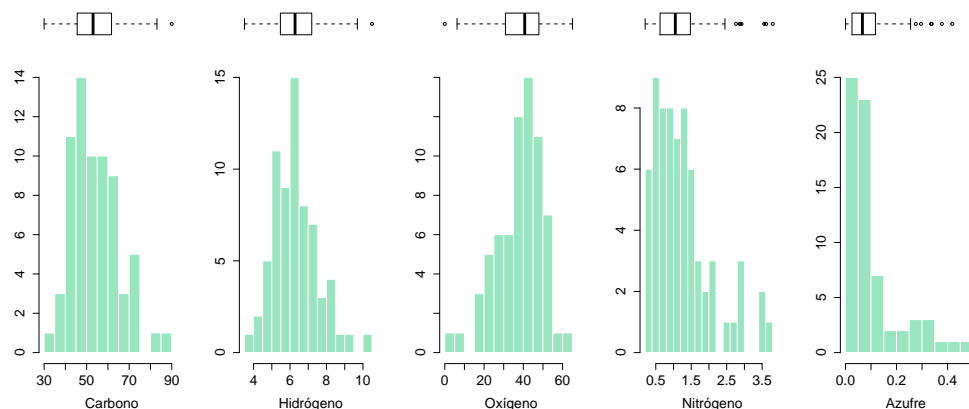


Figura 2.1: Histograma de la distribución de los resultados del análisis elemental

Tabla 2.5: Análisis elemental de los residuos agrícolas representativos

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>C</i> (% <i>p/p</i>)	<i>H</i> (% <i>p/p</i>)	<i>O</i> (% <i>p/p</i>)	<i>N</i> (% <i>p/p</i>)	<i>S</i> (% <i>p/p</i>)
1	Aguacate, cascara	53.40	6.14	39.45	0.95	0.06
2	Aguacate, Frutos de descarte	58.27	6.70	33.72	1.25	0.06
3	Aguacate, Ramas	70.80	8.14	20.22	0.42	0.42
4	Aguacate, Residuos de poda	70.09	8.05	19.91	1.77	0.18
5	Aguacate, Semillas	70.41	8.10	20.64	0.60	0.26
6	Arracacha, Frutos de descarte	87.44	10.05	1.96	0.46	0.09
7	Arracacha, Residuos de poda	73.08	8.40	17.18	1.26	0.09
8	Arroz, Cascarilla	63.83	7.33	28.38	0.36	0.10
9	Arroz, Tamo	55.07	6.34	36.45	2.04	0.10
10	Banano, Frutos de descarte	40.74	6.49	51.92	0.82	0.02
11	Banano, Raquis	42.44	6.17	49.41	1.48	0.50
12	Banano, Vástago	41.91	6.38	50.95	0.68	0.08
13	Cacao, Cacota	48.98	5.63	44.62	0.74	0.03
14	Cacao, Frutos de descarte	56.02	6.44	36.75	0.69	0.10
15	Cacao, Hojas	51.12	5.87	41.23	1.68	0.10
16	Cacao, Tallos	51.15	5.88	42.23	0.73	0.02
17	Café, Cisco	58.88	6.77	33.78	0.54	0.03
18	Café, Pulpa	53.90	6.19	38.72	1.10	0.09
19	Café, Tallos	55.66	6.39	37.11	0.73	0.11
20	Caña de panela, Bagazo	50.06	5.76	43.55	0.59	0.04
21	Caña de panela, Cogollo	41.20	4.73	52.84	1.19	0.04
22	Caña de panela, Hojas	47.10	5.41	46.79	0.62	0.07
23	Cebolla junca, Frutos de descarte	45.79	5.27	45.75	2.86	0.34
24	Cebolla junca, Hojas	41.92	4.82	49.39	3.52	0.34

Tabla 2.5: Análisis elemental de los residuos agrícolas representativos (continuación)

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>C</i> (% <i>p/p</i>)	<i>H</i> (% <i>p/p</i>)	<i>O</i> (% <i>p/p</i>)	<i>N</i> (% <i>p/p</i>)	<i>S</i> (% <i>p/p</i>)
25	Fique, Bagazo	39.37	6.66	52.50	1.46	0.01
26	Frijol, Cascara	64.80	7.45	27.03	0.70	0.02
27	Frijol, Frutos de descarte	67.40	7.74	21.02	3.75	0.08
28	Frijol, Residuos de poda	68.44	7.86	20.65	2.90	0.14
29	Guayaba, Frutos de descarte	62.48	7.18	29.37	0.91	0.06
30	Guayaba, Residuos de poda	80.97	9.31	7.82	1.76	0.15
31	Limón, Cascara	49.13	5.65	44.11	1.10	0.02
32	Limón, Residuos de poda	56.59	6.51	35.62	1.23	0.05
33	Maíz, Capacho	56.83	6.53	36.21	0.31	0.12
34	Maíz, Hojas	52.58	6.04	40.78	0.52	0.08
35	Maíz, Rastrojo	56.37	6.48	36.26	0.82	0.08
36	Maíz, Tusa	50.89	5.85	42.71	0.33	0.22
37	Mandarina, Cascara	47.97	5.76	44.85	1.34	0.07
38	Mandarina, Residuos de poda	48.70	5.36	44.95	0.93	0.05
39	Mora, Hojas y tallos	64.50	7.41	26.54	1.53	0.02
40	Mora, Residuos de descarte	42.14	4.84	51.67	1.33	0.02
41	Mora, Residuos de la fruta	39.15	4.50	54.29	2.03	0.03
42	Naranja, Cascara exterior	49.29	5.66	43.84	1.14	0.06
43	Naranja, Cascara interior	49.35	6.17	43.35	1.09	0.04
44	Naranja, Residuos de poda	44.14	5.07	49.48	1.28	0.03
45	Palma de aceite, Cuesco	44.11	5.08	50.22	0.54	0.05
46	Palma de aceite, Fibra	61.34	7.05	30.30	1.22	0.10
47	Palma de aceite, Raquis	54.97	6.32	37.65	0.99	0.06
48	Papa, Cascaro	47.72	5.48	44.97	1.81	0.02
49	Papa, Frutos de descarte	49.15	5.65	43.70	1.49	0.01
50	Papa, Hojas y tallos	47.69	5.48	44.78	1.99	0.06
51	Papaya, Cascara y semillas	45.18	5.19	47.35	2.07	0.21
52	Papaya, Frutos de descarte	53.60	6.16	38.75	1.42	0.07
53	Papaya, Hojas y tallos	42.34	4.87	49.81	2.85	0.13
54	Piña, Cascara	64.13	7.38	27.38	0.83	0.28
55	Piña, Corazón	63.49	7.30	28.55	0.54	0.11
56	Piña, Frutos de descarte	74.09	8.52	16.41	0.94	0.05
57	Piña, Residuos de poda	67.49	7.76	23.13	1.41	0.20
58	Platano, Frutos de descarte	46.65	5.37	47.39	0.45	0.15
59	Platano, Raquis	36.35	4.18	58.01	1.16	0.30
60	Platano, Vastago	31.56	3.64	63.14	1.32	0.34
61	Tomate, Frutos de descarte	44.18	5.08	48.19	2.45	0.10
62	Tomate, Rastrojo	46.29	5.32	45.26	2.75	0.38

Tabla 2.5: Análisis elemental de los residuos agrícolas representativos (continuación)

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>C</i> (% <i>p/p</i>)	<i>H</i> (% <i>p/p</i>)	<i>O</i> (% <i>p/p</i>)	<i>N</i> (% <i>p/p</i>)	<i>S</i> (% <i>p/p</i>)
63	Yuca, Cascara	58.60	6.74	33.94	0.71	0.01
64	Yuca, Frutos de descarte	53.67	6.17	39.77	0.37	0.02
65	Yuca, Hojas	43.11	4.96	48.33	3.57	0.02
66	Yuca, tallos	60.33	6.93	32.44	0.28	0.02

Por su parte, el nitrógeno (*N*) y el azufre (*S*) constituyen los elementos con menor presencia en la matriz de biomasa lignocelulósica, pero de particular importancia para la protección del medio ambiente. Contenidos significativos de *N* y *S* indican un efecto contaminante, debido principalmente a las emisiones de SO_x y NO_x producidas durante su uso como biocombustible. El contenido de nitrógeno y azufre en los residuos agrícolas en este estudio varió en el rango de 0.31–3.75 % y 0.01–0.50 %, respectivamente. Los frutos de descarte del frijol (3.75 %), el rastrojo de la cebolla junca (3.52 %) y las hojas del cultivo de yuca (3.57 %), presentan los mayores contenidos de nitrógeno. Mientras que los residuos provenientes del raquis de banano (0.50 %) y las ramas de aguacate (0.42 %) presentan los mayores contenidos de azufre.

Por otro lado, la relación carbono/nitrógeno (C/N) de un residuo afecta la actividad bacteriana y, en consecuencia, es una medida indicativa del balance de nutrientes que los organismos anaeróbicos requieren para su crecimiento (Croce et al.; 2016). Si la relación C/N en el sustrato es alta, se conduce a un rápido consumo de nitrógeno y, por lo tanto, a la acumulación de ácidos grasos volátiles en el digestor. Por otro lado, con la proporción más pequeña, se liberará una gran cantidad de nitrógeno y se acumulará en forma de amoníaco (NH_4) y el pH aumentará drásticamente. Las relaciones óptimas de C/N en los digestores anaeróbicos están entre 20 y 30. Los sustratos lignocelulósicos tienen un alto contenido de carbono en comparación con el contenido de nitrógeno. Como consecuencia de esto, se debe combinar con otros sustratos ricos en nitrógeno para ser digeridos (Yong et al.; 2015) o la relación C/N debe reducirse añadiendo cantidades adecuadas de nitrógeno de una fuente mineral, por ejemplo, urea, NH_4Cl o NH_4HCO_3 (Chandra et al.; 2012)

El diagrama ternario presentado en la Figura 2.2 es una herramienta para representar los procesos de conversión de biomasa. Las tres esquinas del triángulo representan carbono+hidrógeno (*C+H*), oxígeno (*O*) y nitrógeno+azufre (*N+S*); es decir, 100 % de concentración. Los puntos dentro del triángulo representan mezclas de estas sustancias.

El lado opuesto a una esquina representa una concentración cero de ese componente o grupo de componentes. Por ejemplo, la base horizontal en el diagrama opuesto a la esquina ($C + H$) representa cero presencia de estos dos compuestos, es decir, mezclas de N , S y O . Se presentan en el diagrama, para efectos de comparación, la concentración elemental de varias muestras de carbón de Colombia publicados por Orrego et al. (2010)

Como se mencionó anteriormente, el diagrama ternario puede representar el proceso de conversión. Por ejemplo, la carbonización o la pirólisis lenta mueven el producto hacia el carbono a través de la formación de carbón sólido; La pirólisis rápida lo mueve hacia el hidrógeno y se aleja del oxígeno, lo que implica un producto líquido más alto. La gasificación por oxígeno mueve el producto de gas hacia la esquina de oxígeno, mientras que la gasificación por vapor aleja el proceso de la esquina de carbono. El proceso de hidrogenación aumenta el hidrógeno y, por lo tanto, mueve el producto hacia el hidrógeno.

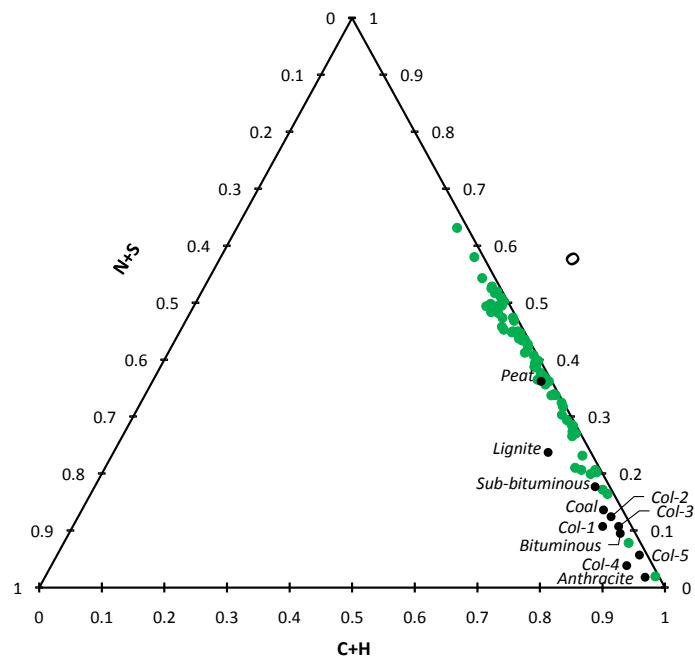


Figura 2.2: Diagrama de fase ternaria de las relaciones molares de carbono+hidrógeno ($C + H$), oxígeno (O) y nitrógeno+azufre ($N + S$) de los residuos agrícolas seleccionados

2.3.2. Análisis próximo

Los resultados del análisis próximo se registran en la Tabla 2.6 y se presentan sobre base seca. El mayor contenido de humedad de los residuos agrícola en comparación con otros combustibles sólidos es uno de sus principales inconvenientes para su aprovechamiento energético. Valores altos de humedad implican altos costos de transporte, bajo poder calorífico y mayores requerimientos tecnológicos; relacionados a menudo con complicaciones durante la etapa de conversión.

El contenido de humedad varió sustancialmente (7.55 % a 94.54 %) entre las diferentes biomásas analizadas (Figura 2.3). Sin embargo, se debe tener en cuenta que el contenido de humedad informado en este estudio representa la humedad del residuo tal y como se ha recolectado en el sitio específico de muestreo. Esto significa que la humedad puede diferir según las condiciones ambientales durante la recolección, transporte y almacenamiento, así como si es entregada por varios proveedores, desde varios lugares, en diferentes épocas del año. Esta situación requiere un esfuerzo integrado de investigación y proyectos piloto para determinar el efecto del contenido de humedad en la cadena de suministro de biomasa y el desarrollo de una hoja de ruta óptima para establecer estrategias de control. Los frutos de descarte del cultivo del tomate presentan una humedad 91.97 %, el raquis y el vástago del banano 94.54 % y 93.62 %, respectivamente, siendo los residuos con mayor valor de este parámetro.

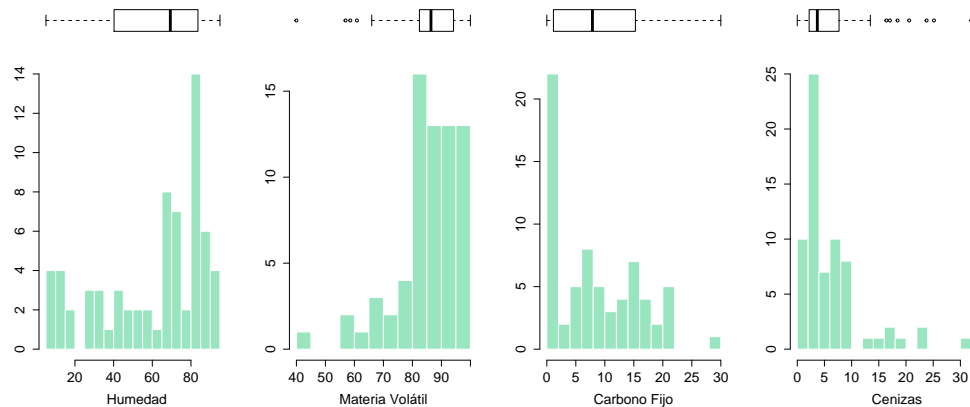


Figura 2.3: Histograma de la distribución de los resultados del análisis próximo

Tabla 2.6: Análisis próximo de los residuos agrícolas representativos

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>Humedad</i> (%p/p)	<i>Material</i> <i>volátil</i> (%p/p)	<i>Carbono</i> <i>fijo</i> (%p/p)	<i>Cenizas</i> (%p/p)
1	Aguacate, cascara	82.42	96.42	0.06	3.52
2	Aguacate, Frutos de descarte	74.17	97.68	0.08	2.24
3	Aguacate, Ramas	14.95	96.17	0.11	3.73
4	Aguacate, Residuos de poda	56.55	92.96	0.07	6.97
5	Aguacate, Semillas	66.74	96.96	0.06	2.98
6	Arracacha, Frutos de descarte	76.11	96.40	0.08	3.52
7	Arracacha, Residuos de poda	83.59	91.23	0.18	8.59
8	Arroz, Cascarilla	7.55	61.15	19.26	19.59
9	Arroz, Tamo	73.59	57.38	20.07	22.55
10	Banano, Frutos de descarte	83.75	73.62	21.00	5.38
11	Banano, Raquis	94.54	58.97	17.23	23.80
12	Banano, Vástago	93.62	66.08	20.93	12.99
13	Cacao, Cacota	87.41	84.43	11.83	3.74
14	Cacao, Frutos de descarte	85.47	73.92	19.48	6.60
15	Cacao, Hojas	17.98	77.03	20.88	2.09
16	Cacao, Tallos	71.68	86.44	11.17	2.39
17	Café, Cisco	10.42	98.82	0.51	0.67
18	Café, Pulpa	80.62	85.72	7.07	7.21
19	Café, Tallos	29.01	92.54	4.76	2.69
20	Caña de panela, Bagazo	43.39	96.79	1.61	1.60
21	Caña de panela, Cogollo	68.50	84.85	7.87	7.28
22	Caña de panela, Hojas	8.58	89.83	4.87	5.30
23	Cebolla junca, Frutos de descarte	71.45	90.65	3.99	5.36
24	Cebolla junca, Hojas	82.53	92.12	0.46	7.42
25	Fique, Bagazo	85.36	95.42	1.99	2.59
26	Frijol, Cascara	51.83	94.25	0.08	5.67
27	Frijol, Frutos de descarte	51.25	96.64	0.04	3.32
28	Frijol, Residuos de poda	83.72	84.16	0.12	15.72
29	Guayaba, Frutos de descarte	81.32	94.54	1.50	3.96
30	Guayaba, Residuos de poda	47.26	90.73	0.06	9.21
31	Limón, Cascara	69.43	81.94	15.15	2.91
32	Limón, Residuos de poda	43.96	82.72	16.00	1.28
33	Maíz, Capacho	8.52	95.29	2.21	2.50
34	Maíz, Hojas	11.30	85.25	6.73	8.02
35	Maíz, Rastrojo	34.06	84.19	7.51	8.30
36	Maíz, Tusa	29.41	97.28	1.23	1.49
37	Mandarina, Cascara	70.19	81.45	16.10	2.45

Tabla 2.6: Análisis próximo de los residuos agrícolas representativos (continuación)

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>Humedad</i> (%p/p)	<i>Material</i> <i>volátil</i> (%p/p)	<i>Carbono</i> <i>fijo</i> (%p/p)	<i>Cenizas</i> (%p/p)
38	Mandarina, Residuos de poda	47.35	84.48	14.66	0.86
39	Mora, Hojas y tallos	29.05	91.00	5.12	3.89
40	Mora, Residuos de descarte	83.91	79.36	17.65	2.99
41	Mora, Residuos de la fruta	82.40	86.99	11.82	1.19
42	Naranja, Cascara exterior	69.30	81.86	14.98	3.16
43	Naranja, Cascara interior	69.99	89.00	8.74	2.26
44	Naranja, Residuos de poda	34.49	83.09	16.11	0.80
45	Palma de aceite, Cuesco	19.86	85.12	7.26	7.62
46	Palma de aceite, Fibra	33.24	85.86	6.98	7.16
47	Palma de aceite, Raquis	59.13	82.57	7.85	9.58
48	Papa, Cascaro	82.09	87.30	9.60	3.10
49	Papa, Frutos de descarte	74.74	84.62	12.79	2.59
50	Papa, Hojas y tallos	91.58	82.54	9.74	7.72
51	Papaya, Cascara y semillas	84.08	84.74	14.69	0.57
52	Papaya, Frutos de descarte	84.54	86.73	9.97	3.29
53	Papaya, Hojas y tallos	78.86	80.62	15.38	4.00
54	Piña, Cascara	74.96	95.73	0.08	4.19
55	Piña, Corazón	85.57	96.74	0.07	3.19
56	Piña, Frutos de descarte	83.49	93.83	0.06	6.11
57	Piña, Residuos de poda	86.40	93.46	1.03	5.51
58	Platano, Frutos de descarte	84.05	69.52	12.87	17.62
59	Platano, Raquis	10.66	69.16	14.52	16.32
60	Platano, Vastago	9.89	41.07	28.79	30.14
61	Tomate, Frutos de descarte	91.97	92.77	1.50	5.73
62	Tomate, Rastrojo	89.75	77.62	20.79	1.59
63	Yuca, Cascara	69.45	76.72	13.89	9.39
64	Yuca, Frutos de descarte	63.98	85.29	12.82	1.89
65	Yuca, Hojas	39.79	85.63	7.64	6.73
66	Yuca, tallos	68.03	85.74	5.85	8.42

El contenido de materia volátil (VM), carbono fijo (FC), y cenizas (A), determinados por análisis próximo, representan también indicadores de la idoneidad de un residuo agrícola para su aprovechamiento energético. El contenido de VM de los residuos agrícolas en este estudio varía entre 41.07 % y 98.82 %. Este parámetro contribuye a aumentar el valor calorífico de los combustibles de biomasa al representar una medida directa de su reactividad y potencial de llama ya que, como es ampliamente aceptado, el combustible gaseoso derivado de la descomposición térmica es una mezcla comple-

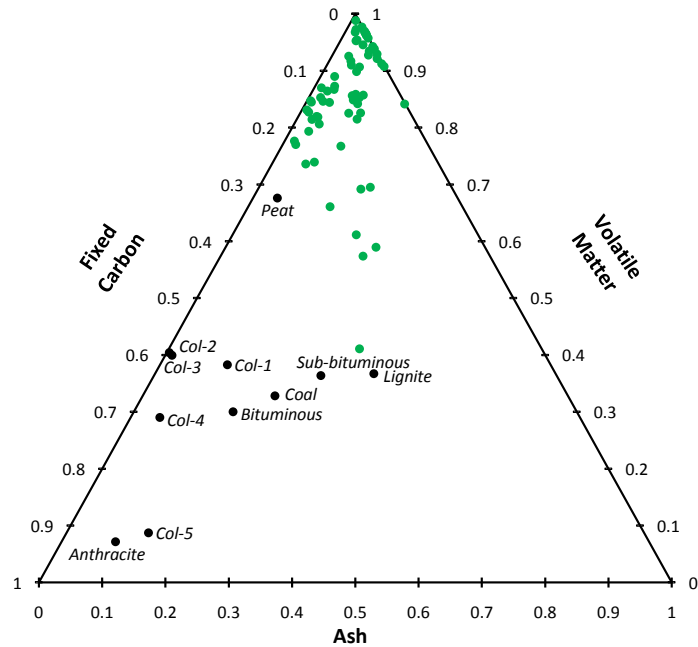


Figura 2.4: Diagrama de fase ternaria de las relaciones de ceniza (A), materia volátil (VM) y carbono fijo (FC) de los residuos agrícolas seleccionados

ja formada principalmente por hidrocarburos C_1-C_3 , alquitrán y gases incombustibles (Saidur et al.; 2011). El cisco del café (98.82 %) presenta el mayor contenido de materia volátil, seguido de los frutos de descarte del aguacate (97.68 %) y la tusa del maíz (97.28 %). El carbono fijo representa el componente no volátil de cualquier combustible sólido, lo que proporciona un indicador efectivo de su rendimiento de carbón. De los resultados del análisis próximo, se puede ver que el contenido de FC está en el rango de 0.04 % – 28.79 %. Sin embargo, los residuos se encuentran mayormente entre los 0 – 10 % (Figura 2.3).

La asociación entre FC y VM, conocida como relación de combustible (relación carbono fijo/ materia volátil), proporciona una medida indirecta de la facilidad con que el combustible sólido puede encenderse y, posteriormente, gasificarse u oxidarse. Por otro lado, el contenido de cenizas es una medida del contenido de minerales y cualquier otra materia inorgánica en la biomasa. Desde esta perspectiva, es esencial para un mejor conocimiento de los límites de la aplicabilidad de la biomasa, asociado con los desafíos de la ruta de conversión y su rendimiento tecnológico. Por ejemplo, un alto contenido de cenizas reduce el valor calorífico del combustible por unidad de peso, aumenta los

costos operativos directamente relacionados con los costos de mantenimiento y afecta negativamente a la conversión termoquímica y bioquímica. El contenido de cenizas en toda la biomasa probada varió ampliamente, desde 0.57 % a 30.14 %, siendo el vástago del plátano el que posee mayor valor de este parámetro (30.14 %), seguido del raquis de banano (23.80 %) y el tamo del arroz (22.55 %). El diagrama ternario presentado en la Figura 2.4 permite inferir lo heterogéneo de las propiedades próximas de los residuos agrícolas y su distancia de las características de las muestras de carbones de Colombia.

2.3.3. Análisis estructural

Los resultados del análisis estructural se muestran en la Tabla 2.7. Este análisis es particularmente importante para comprender la degradación térmica y microbiana de la biomasa para producir combustibles derivados, productos químicos y productos de valor agregado. El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en los residuos varió en el intervalo de 7.06–53.93 %, 1.09–36.77 % y 2.70–48.64 %, respectivamente (ver Figura 2.5). Los altos contenidos de celulosa y hemicelulosa conducen a una degradación más eficiente y reducen el rendimiento de carbón, mientras que los altos contenidos de lignina crean una resistencia a la degradación biológica.

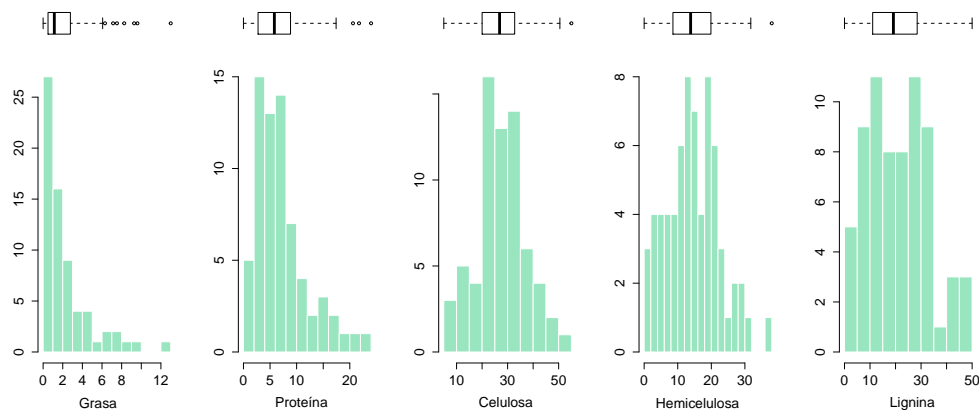


Figura 2.5: Histograma de la distribución de los resultados del análisis estructural

Tabla 2.7: Análisis estructural de los residuos agrícolas representativos

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>Grasa</i> (%p/p)	<i>Prot.</i> (%p/p)	<i>Cel.</i> (%p/p)	<i>Hem.</i> (%p/p)	<i>Lig.</i> (%p/p)	<i>Almidón</i> (%p/p)
1	Aguacate, cascara	4.08	5.63	21.26	18.71	28.63	N.A.
2	Aguacate, Frutos de descarte	12.27	7.38	26.07	5.40	36.60	N.A.
3	Aguacate, Ramas	0.68	2.56	28.35	17.32	27.34	N.A.
4	Aguacate, Residuos de poda	2.88	9.06	39.95	14.30	20.03	N.A.
5	Aguacate, Semillas	3.89	3.63	18.27	13.47	7.14	N.A.
6	Arracacha, Frutos de descarte	1.87	2.75	22.39	5.27	34.27	N.A.
7	Arracacha, Residuos de poda	0.83	7.06	20.14	7.88	18.04	N.A.
8	Arroz, Cascarilla	0.35	1.81	53.93	2.73	41.00	N.A.
9	Arroz, Tamo	1.68	9.86	24.07	4.70	33.92	N.A.
10	Banano, Frutos de descarte	0.75	4.75	33.42	13.65	19.93	N.A.
11	Banano, Raquis	0.36	6.69	32.76	9.89	12.81	N.A.
12	Banano, Vástago	0.56	3.18	37.14	12.52	21.08	N.A.
13	Cacao, Cacota	0.56	4.25	21.19	14.93	25.30	N.A.
14	Cacao, Frutos de descarte	2.02	4.00	25.11	14.73	25.15	N.A.
15	Cacao, Hojas	4.45	9.38	20.14	28.12	32.80	N.A.
16	Cacao, Tallos	0.54	4.31	30.27	36.77	23.34	N.A.
17	Café, Cisco	0.96	1.24	35.55	21.89	32.33	N.A.
18	Café, Pulpa	2.81	2.57	26.06	21.06	23.34	N.A.
19	Café, Tallos	0.97	1.97	34.84	20.84	30.39	N.A.
20	Caña de panela, Bagazo	0.55	3.60	38.94	18.28	27.34	N.A.
21	Caña de panela, Cogollo	1.33	6.86	24.51	13.17	19.33	N.A.
22	Caña de panela, Hojas	0.77	3.70	27.83	15.32	32.12	N.A.
23	Cebolla junca, Frutos de descarte	1.86	16.44	22.33	2.30	5.97	N.A.
24	Cebolla junca, Hojas	3.84	19.44	26.24	6.08	7.56	N.A.
25	Fique, Bagazo	4.13	4.38	41.81	22.17	15.76	N.A.
26	Frijol, Cascara	0.66	4.19	43.79	19.87	6.12	N.A.
27	Frijol, Frutos de descarte	2.57	22.44	36.83	12.69	10.68	N.A.
28	Frijol, Residuos de poda	1.51	16.63	31.39	21.03	14.68	N.A.
29	Guayaba, Frutos de descarte	2.85	5.44	21.07	18.02	17.22	N.A.
30	Guayaba, Residuos de poda	2.37	10.25	38.93	22.79	4.52	N.A.
31	Limón, Cascara	1.02	6.50	14.19	9.11	12.89	N.A.
32	Limón, Residuos de poda	0.77	7.25	34.93	22.49	21.02	N.A.
33	Maíz, Capacho	0.64	1.86	49.69	7.92	45.89	N.A.
34	Maíz, Hojas	0.75	3.00	42.78	10.78	43.54	N.A.
35	Maíz, Rastrojo	1.40	4.71	31.51	10.98	45.60	N.A.
36	Maíz, Tusa	0.40	2.07	46.81	10.73	48.64	N.A.
37	Mandarina, Cascara	7.23	7.88	23.39	13.36	13.27	N.A.
38	Mandarina, Residuos de poda	0.77	5.63	30.42	28.46	24.87	N.A.

Tabla 2.7: Análisis estructural de los residuos agrícolas representativos (continuation)

<i>ID</i>	<i>Residuo</i>	<i>Grasa</i> (%p/p)	<i>Prot.</i> (%p/p)	<i>Cel.</i> (%p/p)	<i>Hem.</i> (%p/p)	<i>Lig.</i> (%p/p)	<i>Almidón</i> (%p/p)
39	Mora, Hojas y tallos	2.49	9.06	25.43	19.16	19.17	N.A.
40	Mora, Residuos de descarte	3.46	8.00	14.76	15.80	25.21	N.A.
41	Mora, Residuos de la fruta	7.91	12.31	19.20	19.04	26.55	N.A.
42	Naranja, Cascara exterior	1.83	6.81	23.72	14.04	10.65	N.A.
43	Naranja, Cascara interior	1.30	6.31	24.55	13.54	13.37	N.A.
44	Naranja, Residuos de poda	1.23	7.44	30.64	27.08	25.75	N.A.
45	Palma de aceite, Cuesco	9.15	4.31	22.45	2.49	41.32	N.A.
46	Palma de aceite, Fibra	6.87	6.94	8.38	19.11	27.05	N.A.
47	Palma de aceite, Raquis	0.41	5.59	28.46	16.45	22.67	N.A.
48	Papa, Cascaro	0.68	10.63	13.10	19.65	6.69	44.21
49	Papa, Frutos de descarte	0.31	8.88	7.06	24.70	3.47	52.53
50	Papa, Hojas y tallos	1.68	10.59	28.22	14.13	14.18	N.A.
51	Papaya, Cascara y semillas	8.84	11.94	15.58	1.79	13.54	N.A.
52	Papaya, Frutos de descarte	1.16	8.44	10.56	1.12	3.74	N.A.
53	Papaya, Hojas y tallos	4.38	15.31	31.82	10.42	9.12	N.A.
54	Piña, Cascara	0.85	5.00	30.95	8.81	7.49	N.A.
55	Piña, Corazón	0.54	3.31	21.35	10.29	7.63	N.A.
56	Piña, Frutos de descarte	0.99	5.63	28.93	9.17	32.92	N.A.
57	Piña, Residuos de poda	2.22	8.31	27.88	20.64	13.03	N.A.
58	Platano, Frutos de descarte	3.63	15.25	30.08	1.09	30.59	N.A.
59	Platano, Raquis	0.94	6.81	29.53	3.18	20.59	N.A.
60	Platano, Vastago	1.30	6.44	20.18	30.91	2.70	N.A.
61	Tomate, Frutos de descarte	2.25	13.75	13.26	7.82	6.86	N.A.
62	Tomate, Rastrojo	5.89	14.56	27.26	12.17	14.17	N.A.
63	Yuca, Cascara	0.99	4.00	20.08	5.97	16.65	28.77
64	Yuca, Frutos de descarte	1.67	2.25	7.62	16.44	3.95	60.63
65	Yuca, Hojas	6.11	20.44	18.45	11.98	32.46	N.A.
66	Yuca, tallos	1.17	1.63	30.63	27.23	18.33	N.A.

La celulosa está asociada físicamente con la hemicelulosa y está asociada física y químicamente con la lignina (Triolo et al.; 2011; Mussatto et al.; 2008). La celulosa es la principal fracción biodegradable del sustrato lignocelulósico. Sin embargo, su asociación con la lignina forma una barrera física que confiere resistencia a la biodegradación natural (Sukhesh & Rao; 2018). Por lo tanto, la relación celulosa/lignina representa un indicador del alcance de la digestión anaeróbica. La lignina en sustratos lignocelulósicos representa el principal obstáculo físico para que las bacterias metabolicen la holocelulosa (Croce et al.; 2016). Las investigaciones teóricas y empíricas sugieren que la lignina

constituye una limitación para la actividad bacteriana. En particular, actúa como una barrera física, al no ser degradable en ambientes anaeróbicos (Nizami et al.; 2009; Triolo et al.; 2011).

Existe un consenso en la literatura sobre el efecto de la lignina en la biodegradabilidad del sustrato en sistemas anaeróbicos. Según varios autores, el potencial de metano se correlaciona negativamente con el contenido de lignina (Monlau et al.; 2012; Gunaseelan; 2007; Triolo et al.; 2011, 2012; Thomsen et al.; 2014). Por lo tanto, tiene sentido aumentar el rendimiento de metano mediante un tratamiento previo fisicoquímico que separe la lignina de la celulosa y/o solubilice la lignina en sustratos anaeróbicamente digestibles (Kayhanian et al.; 2007; Amin et al.; 2017). Sin embargo, los mecanismos por los cuales los tratamientos previos mejoran la digestibilidad de la lignocelulosa no se conocen bien. Varios estudios revelaron que solo pequeños cambios en el contenido de lignina pueden asociarse con una mayor generación de metano, lo que sugiere un papel estructural más que químico en dichos procesos (Vivekanand et al.; 2012). (Li et al.; 2015) sugieren que no es necesario eliminar grandes cantidades de lignina de la biomasa para lograr el máximo rendimiento de biogás. Parece suficiente eliminar 30–60 % de la lignina máxima (que corresponde a valores absolutos de 12–24 %) para obtener 80–90 % del rendimiento máximo de biogás. Además, generalmente se retiene más celulosa y hemicelulosa con menos eliminación de lignina. Los residuos provenientes del maíz, tusa (48.64 %), capacho (45.89 %), rastrojo (45.60 %) y hojas (43.54 %), presentan los mayores contenidos de lignina.

2.3.4. Análisis de clúster

Como se ha discutido en las secciones previas, la composición química de un residuo, representa una expresión simplificada o código fundamental asociado a un orden y estructura de sus elementos, de modo que ofrece información específica de soporte para la selección de la tecnología de conversión, térmica o biológica, de una biomasa o mezcla de biomásas en particular. Con base en los resultados de su composición química y por análisis de clúster o conglomerados jerárquicos (HCA), la mayoría de los residuos agrícolas se pueden clasificar en distintos grupos. Así, las diferencias y/o similitudes en asociación con las propiedades fisicoquímicas del recurso permitirían identificar grupos de biomásas con una composición semejante, los cuales posiblemente exhibirían un comportamiento similar al ser sometido a un proceso de conversión particular y a unas condiciones de operación análogas.

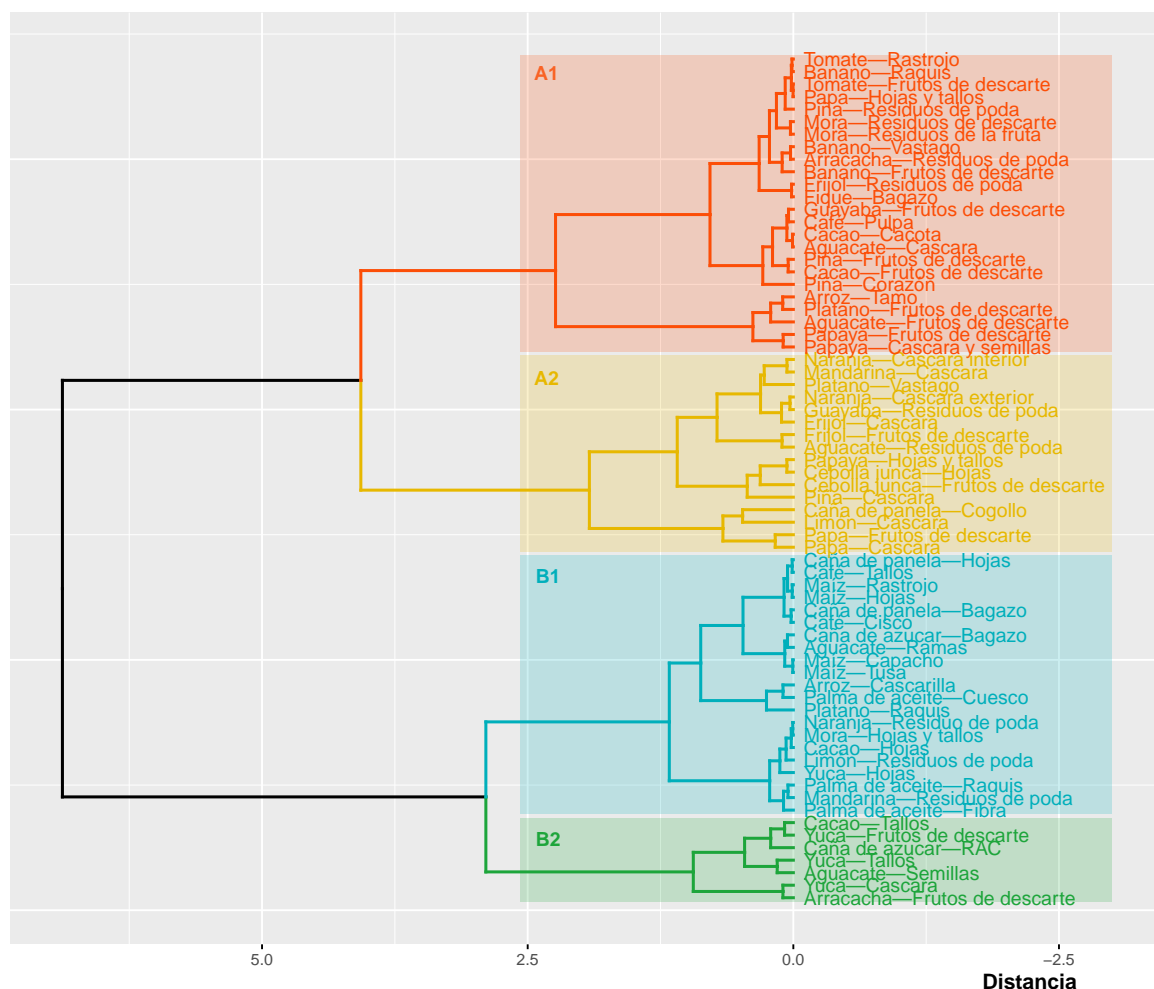


Figura 2.6: Dendrograma para la identificación de residuos agrícolas idóneos para digestión anaerobia basado en los parámetros descriptores seleccionados.

El resultado de estas asociaciones generalmente se representa en un dendrograma (árbol de agrupamiento), con distancias más cortas entre las ramas que presentan similitudes más altas entre las muestras. Para el caso de la digestión anaerobia se han seleccionado seis propiedades del residuo agrícola que resultan ser significativos dado su impacto y pertinencia en la tecnología; estos son: celulosa (x_1), celulosa/lignina (x_2), celulosa/hemicelulosa (x_3), C/N (x_4), TS (x_5) y VS/TS (x_6). Para el caso de la pirólisis y la gasificación se seleccionaron un mismo grupo de variables descriptoras sugiriendo que, mediante el mismo grupo de variables se puede describir a estas dos tecnologías de transformación termoquímica. Los parámetros seleccionados resultaron ser: M (x_1), VM (x_2), FC/VM (x_3), FC/A (x_4), C (x_5), H (x_6), O/C (x_7) y H/N (x_8).

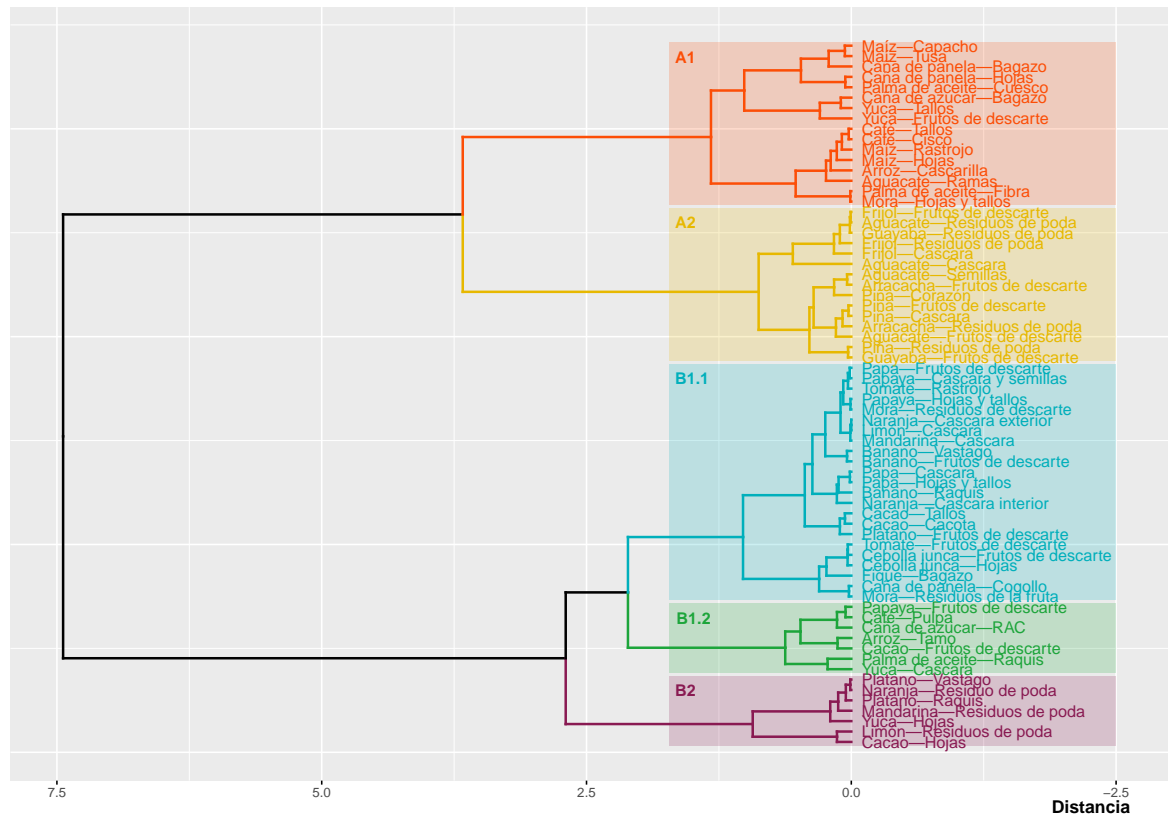


Figura 2.7: Dendrograma para la identificación de residuos agrícolas idóneos para tecnologías de transformación termoquímicas (pirólisis y gasificación) basado en los parámetros descriptores seleccionados.

El dendrograma presentado en la Figura 2.6 permitió la clasificación de los residuos agrícolas en cuatro grupos principales de acuerdo a su idoneidad para la digestión anaerobia. El clúster A1, marcado en rojo, agrupa las muestras de residuos agrícolas que poseen una alta relación VS/TS y una adecuada relación C/N; indispensable para los procesos de digestión. En este grupo se pueden identificar residuos como el rastrojo del tomate, bagazo de fique, pulpa de café y raquis de banana. El clúster A2, marcado en amarillo, recoge las muestras de residuos con mayor relación celulosa/lignina. En este grupo se encuentran residuos como el vástago del plátano, el cogollo de la caña de panela, y residuos de la cebolla junca y de la papa. Ambos grupos presentan características adecuadas para la digestión anaerobia, sea porque presentan alto contenido de sólidos volátiles y celulosa, o porque presentan una adecuada relación carbono-nitrógeno y bajo contenido de lignina.

Por otro lado, el clúster B1, marcado en azul, está compuesto por muestras que se

caracterizan por un alto contenido de sólidos totales, así como lignina. Al clúster B1 pertenecen residuos como el raquis de plátano y de la palma de aceite, el bagazo de la caña de azúcar y los residuos provenientes del cultivo de maíz; citados en la sección 2.3.3 como los de mayor contenido de lignina y en correspondencia menores relación celulosa a lignina. Asimismo, el clúster B2, marcado en verde, se caracteriza principalmente por las más altas relaciones C/N . Para ilustrar las diferencias entre los conglomerados obtenidos, se realizó el análisis e interpretación de los diagramas de cajas (*box-plot*), los cuales se presentan en las figuras A.1 y A.2 del apéndice A.

Para el caso de las tecnologías de transformación termoquímicas y de acuerdo al dendrograma generado (Figura 2.7) se obtuvieron también dos grandes grupos, clusters (A y B) y cinco subclusters. Los subgrupos B1.1, B1.2 y B1 están conectados entre sí, lo que muestra las similitudes de estos tres subgrupos. En términos generales se caracterizan por presentar los menores contenidos de materia volátil en prelación a mayores contenidos de carbono fijo. El segundo grupo principal (clúster A) es distinto del primer grupo, al incluir residuos con mayor contenido de carbono e hidrógeno. El clúster A tiene dos subclústeres diferentes (A1 y A2). El clúster B1.1, marcado en azul, esta compuesto por residuos con un alto contenido de humedad, lo cual representa un reto tecnológico dado que el proceso de secado aumenta los requerimientos energéticos y contrarresta así los beneficios potenciales de la biomasa. Dai et al. (2012) indica que el contenido máximo de humedad de las materias primas para procesos termo-químicos puede llegar hasta el 65 %, sin embargo el contenido óptimo se encuentra entre el 10 % y el 20 % (base húmeda).

Los clúster A1 y A2 tienen una menor relación FC/VM y, en consecuencia, una mayor conversión del carbón por una mayor reactividad; ya que la ignición es más fácil a bajas temperaturas con la ayuda de mayor presencia de materia volátil, lo cual es ideal para fines de gasificación. En contraste, una mayor relación FC/VM, como en los clúster B, implicaría un mayor contenido de FC, lo que proporciona un mayor calor de combustión, idóneo para la combustión directa y pirólisis.

2.3.5. Modelos RNA

El desempeño de cualquier modelo RNA depende del nivel de comprensión que se tiene sobre el problema en cuestión, en relación no solo a la identificación y selección de las variables descriptoras del problema entre la cantidad de parámetros directamente relacionados con la variable de respuesta, sino también a la factibilidad de medición

Tabla 2.8: Detalles de la arquitectura y desempeño de los modelos RNA

	Digestión Anaerobia	Pirólisis	Gasificación
Tipo de red	Retro-propagación hacia delante	Retro-propagación hacia delante	Retro-propagación hacia delante
Algoritmo de entrenamiento	Algoritmo de Levenberg–Marquardt	Algoritmo de Levenberg–Marquardt	Algoritmo de Levenberg–Marquardt
Función de aprendizaje adaptativo	Descenso por gradiente	Descenso por gradiente	Descenso por gradiente
Función de rendimiento	Error cuadrático medio (MSE)	Error cuadrático medio (MSE)	Error cuadrático medio (MSE)
Función de transferencia	Tangente hiperbólica sigmoide	Tangente hiperbólica sigmoide	Tangente hiperbólica sigmoide
División de datos	Aleatorio	Aleatorio	Aleatorio
Ciclo de aprendizaje	1000 iteraciones	1000 iteraciones	1000 iteraciones
Topología	7:9:1	11:10:3	12:10:5
R² Entrenamiento	0.937	0.947	0.992
R² Validación	0.936	0.906	0.928
R² Ensayo	0.886	0.907	0.944
R² Global	0.929	0.936	0.975

Los predictores candidatos se seleccionaron a priori en función de la experiencia técnica, la literatura disponible y análisis de datos. Para el caso de la digestión anaerobia (Tabla A.1), por ejemplo, estimar el rendimiento de metano (y_1) es posible a partir de la celulosa (x_1), la relación celulosa–lignina (x_2), la relación celulosa–hemicelulosa, (x_3), la relación Carbono–Nitrógeno (x_4), los sólidos totales (x_5), la relación Solidos Totales–Solidos Volátiles (x_6) y la relación Inoculo–Sustrato (x_7). Así, para este caso, el número de parámetros de entrada es siete y el número de parámetros de salida solo uno.

Los modelos se entrenaron y probaron utilizando funciones de transferencia no lineal (función de transferencia sigmoidea tangente hiperbólica y función de transferencia log–sigmoide) en la capa oculta y una función de transferencia lineal en la capa de salida. El conjunto de datos utilizado para desarrollar el modelo ANN contiene 120 patrones de entrada/salida para el modelo de digestión, 150 para el modelo de pirólisis y 200 para el modelo de gasificación, de los cuales el 70 % se utilizan para el entrenamiento, el 30 % para pruebas y validación del modelo. Además, los conjuntos de datos de entrada son aleatorios para todas y cada una de las iteraciones.

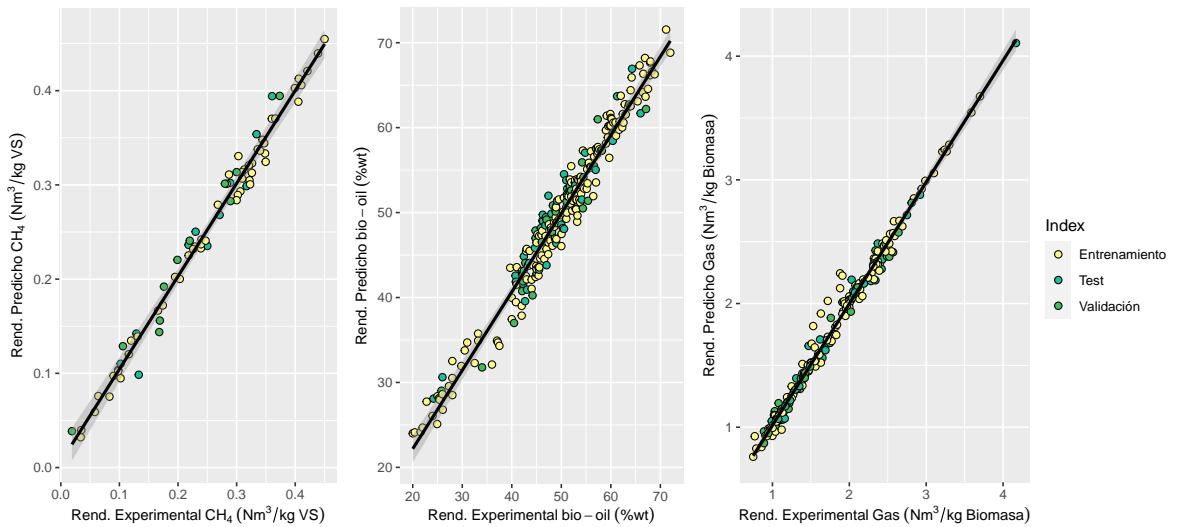


Figura 2.8: Gráfico de paridad que muestra la distribución de los valores experimentales frente a los predichos en los modelos RNA para: a. Digestión Anaerobia, b. Pirólisis, y c. Gasificación

También se realizaron simulaciones variando el número de capas ocultas en el modelo y la función de transferencia. Las redes se entrenan con un número variable de neuronas ocultas en una capa oculta con diferentes combinaciones de funciones de transferencia. El rendimiento de la red se evalúa sobre la base del MSE. La arquitectura ANN con el MSE más bajo indica un mejor modelo en términos de precisión predictiva. En la Tabla 2.8 se presentan los detalles de la arquitectura de la red (número de capas), su topología (patrón de interconexión), el algoritmo de entrenamiento (régimen de aprendizaje) llevado a cabo en el diseño de los modelos RNA, y el número de neuronas ocultas en las capas ocultas; que son las unidades de adaptación no lineal en las que se puede usar un mayor número de neuronas ocultas para lograr un mayor “grado de libertad” y permitir que la red almacene patrones más complejos.

En la Tabla 2.8 también se registran los algoritmos que se aplicaron, y los valores del coeficiente de determinación R^2 obtenidos de acuerdo con estos algoritmos para la estimación de los parametros de desempeños de cada tecnología. Todos los valores del coeficiente R^2 obtenidos en los modelos se lograron utilizando tres algoritmos de entrenamiento diferentes; siendo el algoritmo de Lavenberg–Marquardt el que ofreció los mejores resultados.

El gráfico de paridad en la Fig. 2.8 compara los valores de respuesta para cada tecnología (valores predichos) contra los valores experimentales de los conjuntos de

Tabla 2.9: Predicción del rendimiento a CH_4 del modelo RNA de digestión anaerobia

<i>ID</i>	<i>Biomass</i>	<i>Formula</i>	y_T ($m^3kg^{-1}SV$)	y_{RNA} ($m^3kg^{-1}SV$)	<i>Bo</i> (-)	<i>Clúster</i>
2	Arracacha, Residuos de poda	$C_{68}H_{94}O_{12}N$	0.850	0.3179	0.374	A1
6	Aguacate, Cascara	$C_{66}H_{91}O_{36}N$	0.527	0.2422	0.460	A1
8	Banano, Raquis	$C_{33}H_{58}O_{29}N$	0.389	0.2384	0.613	A1
9	Banano, Frutos de descarte	$C_{58}H_{110}O_{55}N$	0.375	0.2461	0.656	A1
10	Banano, Vástago	$C_{72}H_{132}O_{66}N$	0.388	0.2048	0.528	A1
11	Mora, Residuos de la fruta	$C_{22}H_{31}O_{23}N$	0.289	0.1635	0.565	A1
19	Cacao, Cacota	$C_{77}H_{107}O_{53}N$	0.454	0.2530	0.557	A1
20	Cacao, Frutos de descarte	$C_{94}H_{130}O_{46}N$	0.571	0.2087	0.366	A1
23	Café, Pulpa	$C_{57}H_{79}O_{31}N$	0.535	0.1963	0.367	A1
29	Fique, Bagazo	$C_{31}H_{64}O_{31}N$	0.362	0.2752	0.761	A1
32	Guayaba, Frutos de descarte	$C_{80}H_{110}O_{28}N$	0.676	0.2439	0.361	A1
52	Piña, Frutos de descarte	$C_{92}H_{127}O_{15}N$	0.867	0.3293	0.380	A1
53	Piña, Residuos de poda	$C_{56}H_{77}O_{14}N$	0.759	0.2377	0.313	A1
57	Papa, Hojas y tallos	$C_{28}H_{39}O_{20}N$	0.430	0.1969	0.458	A1
62	Frijol, Residuos de poda	$C_{28}H_{38}O_6N$	0.770	0.2350	0.305	A1
67	Tomate, Rastrojo	$C_{20}H_{27}O_{14}N$	0.408	0.1966	0.482	A1
68	Tomate, Frutos de descarte	$C_{21}H_{29}O_{17}N$	0.372	0.2330	0.627	A1
7	Aguacate, Residuos de poda	$C_{46}H_{64}O_{10}N$	0.801	0.1768	0.221	A2
33	Guayaba, Residuos de poda	$C_{54}H_{74}O_4N$	0.980	0.2867	0.293	A2
34	Limón, Cascara	$C_{52}H_{72}O_{35}N$	0.456	0.1807	0.396	A2
36	Mandarina, Cascara	$C_{42}H_{60}O_{29}N$	0.444	0.1065	0.240	A2
41	Naranja, Cascara interior	$C_{53}H_{79}O_{35}N$	0.475	0.1757	0.370	A2
42	Naranja, Cascara exterior	$C_{50}H_{70}O_{34}N$	0.459	0.1491	0.325	A2
46	Caña de panela, Cogollo	$C_{41}H_{56}O_{39}N$	0.325	0.0835	0.257	A2
47	Papaya, Hojas y tallos	$C_{17}H_{24}O_{15}N$	0.341	0.2310	0.678	A2
51	Piña, Cascara	$C_{90}H_{124}O_{29}N$	0.706	0.2869	0.406	A2
58	Papa, Cascara	$C_{31}H_{42}O_{22}N$	0.431	0.2195	0.510	A2
59	Papa, Frutos de descarte	$C_{39}H_{53}O_{26}N$	0.455	0.2334	0.513	A2
61	Frijol, Frutos de descarte	$C_{21}H_{29}O_5N$	0.750	0.1913	0.255	A2
38	Palma de aceite, Raquis	$C_{64}H_{89}O_{33}N$	0.553	0.2047	0.370	B1

datos de entrenamiento, test y validación. La desviación de los puntos de datos de la línea de paridad fue pequeña, lo que indica una excelente concordancia entre los valores predichos y experimentales. Los valores de R^2 obtenidos para el conjunto de datos de entrenamiento, el conjunto de datos de validación y el conjunto de datos completo se dan en la Tabla 2.8, lo que respalda aún más la observación antes mencionada. El conjunto de datos de validación mostró una desviación ligeramente mayor en comparación con

el gráfico de paridad del conjunto de datos de entrenamiento. No obstante, la buena distribución de los puntos de datos de validación alrededor de la línea de paridad indicó la alta capacidad de predicción del modelo.

En las Tablas 2.9, 2.10 y 2.11 se observan los resultados de ensayar cada biomasa, por cada modelo. Para el caso de la digestión anaerobia, y de acuerdo a la selección de los residuos por el algoritmo de clasificación, los residuos que pertenecían a los clúster A1 y A2, marcados en rojo y amarillo, respectivamente, fueron en su mayoría los clasificados como aptos para esta tecnología de transformación biológica, tal y como sugería el análisis de clúster jerárquicos.

Tabla 2.10: Predicción del rendimiento a bio-oil de acuerdo al modelo RNA de pirólisis

ID	Residuo	$Y_{Bio-oil}$ (%)	Y_{Char} (%)	Y_{Gas} (%)	Clúster
19	Cacao—Cacota	51.13	24.81	24.07	B1.1
21	Cacao—Tallos	46.73	24.23	29.04	B1.1
23	Café—Pulpa	43.84	25.40	30.75	B1.2
31	Cebolla junca—Frutos de descarte	53.57	27.48	18.94	B1.1
34	Limón—Cascara	53.12	25.13	21.75	B1.1
36	Mandarina—Cascara	61.19	24.77	14.04	B1.1
41	Naranja—Cascara interior	59.70	24.70	15.59	B1.1
42	Naranja—Cascara exterior	53.67	25.10	21.23	B1.1
49	Papaya—Frutos de descarte	46.66	24.82	28.52	B1.2
57	Papa—Hojas y tallos	54.40	26.88	18.71	B1.1
58	Papa—Cascara	56.14	25.69	18.16	B1.1
59	Papa—Frutos de descarte	53.45	25.37	21.18	B1.1
67	Tomate—Rastrojo	54.91	25.99	19.10	B1.1
16	Yuca—Frutos de descarte	42.42	19.39	38.20	A1
24	Café—Tallos	43.69	22.36	33.95	A1
25	Maíz—Tusa	47.60	26.23	26.17	A1
26	Maíz—Capacho	50.86	18.47	30.71	A1
27	Maíz—Hojas	42.91	25.16	31.93	A1
28	Maíz—Rastrojo	41.93	22.43	35.64	A1
44	Caña de panela—Bagazo	48.66	23.37	27.98	A1
45	Caña de panela—Hojas	50.80	26.42	22.78	A1
18	Cacao—Hojas	52.82	25.74	21.43	B2
37	Mandarina—Residuos de poda	52.02	24.68	23.31	B2
20	Cacao—Frutos de descarte	44.37	22.94	32.69	B1.2
38	Palma de aceite—Raquis	42.27	24.01	33.72	B1.2
55	Plátano—Frutos de descarte	49.05	27.34	23.61	B1.1

Tabla 2.11: Predicción del rendimiento a gas de síntesis y su composición de acuerdo al modelo RNA de gasificación

Residuo	Y_{Gas} ($Nm^3 \cdot kg^{-1}$)	CO (%m)	CO ₂ (%m)	CH ₄ (%m)	H ₂ (%m)	LHV ($MJ \cdot Nm^3$)	Clúster
Tomate—Rastrojo	1.620	27.77	24.15	10.47	37.56	11.31	B1.1
Papa—Hojas y tallos	1.385	37.70	35.72	8.85	17.71	9.84	B1.1
Papaya—Cascara y semillas	1.877	28.40	36.99	5.58	29.03	8.71	B1.1
Papa—Cascara	1.030	33.54	37.50	8.68	20.27	9.53	B1.1
Papa—Frutos de descarte	1.057	25.70	41.81	8.97	23.51	8.99	B1.1
Mandarina—Cascara	1.112	21.76	38.51	8.79	30.93	9.23	B1.1
Naranja—Cascara exterior	1.086	22.55	43.16	9.13	25.15	8.83	B1.1
Limón—Cascara	1.367	22.40	41.38	9.19	27.02	9.03	B1.1
Cacao—Cacota	1.436	28.77	40.19	8.81	22.22	9.18	B1.1
Cacao—Tallos	1.401	28.18	46.64	8.39	16.78	8.37	B1.1
Banano—Vástago	1.949	26.31	19.15	6.36	48.22	10.80	B1.1
Plátano—Frutos de descarte	1.632	39.61	31.46	9.67	19.22	10.53	B1.1
Cacao—Frutos de descarte	1.878	26.90	30.09	12.13	30.82	11.07	B1.2
Papaya—Frutos de descarte	1.530	29.69	47.04	8.19	15.04	8.30	B1.2
Plátano—Vástago	1.430	36.45	23.43	3.36	36.73	9.76	B2
Plátano—Raquis	1.502	26.23	29.51	5.55	38.76	9.48	B2
Cacao—Hojas	1.583	19.46	40.68	10.68	29.17	9.43	B2
Yuca—Frutos de descarte	1.787	32.38	46.71	9.67	11.21	8.76	A1

2.4. Conclusiones

En este estudio se caracterizaron más de 68 residuos agrícolas de Santander, lo que permitió una base de datos útil para evaluar su potencial aprovechamiento tecnológico. La combinación de caracterización química y análisis de clúster permite una fácil interpretación de las similitudes y diferencias entre los residuos en cuanto a su producción de energía. El análisis de conglomerados jerárquicos (HCA), como herramienta exploratoria de análisis del conjunto de datos obtenidos sobre la composición de residuos agrícolas, representó una guía útil para obtener una visión general y realizar un análisis comparativo de los distintos tipos de residuos y clasificarlos de acuerdo a su idoneidad para determinada tecnología de conversión.

Referencias

- Abbasi, T. & Abbasi, S. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(3), 919–937.
- Abdullah, N., Gerhauser, H., & Sulaiman, F. (2010). Fast pyrolysis of empty fruit bunches. *Fuel*, *89*(8), 2166–2169.
- Alaru, M., Olt, J., Kukk, L., Luna-delRisco, M., Lauk, R., Noormets, M., et al. (2011). Methane yield of different energy crops grown in estonian conditions. *Agronomy Research*, *9*(Special Issue I), 13–22.
- Amin, F. R., Khalid, H., Zhang, H., u Rahman, S., Zhang, R., Liu, G., & Chen, C. (2017). Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Express*, *7*(1), 72.
- Amin, S. B., Chang, Y., Khan, F., & Taghizadeh-Hesary, F. (2021). Energy security and sustainable energy policy in bangladesh: From the lens of 4As framework. *Energy Policy*, 112719.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., & Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure—influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *118*(1), 173–182.
- Ascher, S., Watson, I., & You, S. (2021). Machine learning methods for modelling the gasification and pyrolysis of biomass and waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111902.
- Baruah, D. & Baruah, D. (2014). Modeling of biomass gasification: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 806–815.
- Baruah, D., Baruah, D., & Hazarika, M. (2017). Artificial neural network based modeling of biomass gasification in fixed bed downdraft gasifiers. *Biomass and Bioenergy*, *98*, 264 – 271.

- Bok, J. P., Choi, H. S., Choi, J. W., & Choi, Y. S. (2013). Fast pyrolysis of miscanthus sinensis in fluidized bed reactors: characteristics of product yields and biocrude oil quality. *Energy*, *60*, 44–52.
- Campoy, M., Gómez-Barea, A., Vidal, F. B., & Ollero, P. (2009). Air–steam gasification of biomass in a fluidised bed: process optimisation by enriched air. *Fuel Processing Technology*, *90*(5), 677–685.
- Cao, Y., Wang, Y., Riley, J. T., & Pan, W.-P. (2006). A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas. *Fuel Processing Technology*, *87*, 343–353.
- Cardoen, D., Joshi, P., Diels, L., Sarma, P. M., & Pant, D. (2015). Agriculture biomass in india: Part 1. estimation and characterization. *Resources, Conservation and Recycling*, *102*, 39–48.
- Carrier, M., Joubert, J.-E., Danje, S., Hugo, T., Görgens, J., & Knoetze, J. H. (2013). Impact of the lignocellulosic material on fast pyrolysis yields and product quality. *Bioresource Technology*, *150*, 129 – 138.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(3), 1462–1476.
- Chavan, P., Sharma, T., Mall, B., Rajurkar, B., Tambe, S., Sharma, B., & Kulkarni, B. (2012). Development of data-driven models for fluidized-bed coal gasification process. *Fuel*, *93*, 44–51.
- Cheng, X.-Y. & Zhong, C. (2014). Effects of feed to inoculum ratio, co-digestion, and pretreatment on biogas production from anaerobic digestion of cotton stalk. *Energy & Fuels*, *28*(5), 3157–3166.
- Christodoulou, C., Grimekis, D., Panopoulos, K. D., Vamvuka, D., Karellas, S., & Kakaras, E. (2014). Circulating fluidized bed gasification tests of seed cakes residues after oil extraction and comparison with wood. *Fuel*, *132*, 71–81.
- Contreras, L., Schelle, H., Sebrango, C., & Pereda, I. (2012). Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process. *Water Science and Technology*, *65*(6), 1142–1149.

- Croce, S., Wei, Q., D’Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: the effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology advances*, *34*(8), 1289–1304.
- Dai, J., Cui, H., & Grace, J. R. (2012). Biomass feeding for thermochemical reactors. *Progress in Energy and Combustion Science*, *38*(5), 716–736.
- Damartzis, T. & Zabaniotou, A. (2011). Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 366 – 378.
- DANE (2014). Resultados definitivos. Tercer Censo Nacional Agropecuario. Technical report, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Bogotá D.C.
- Dharfizi, A. D. H., Ghani, A. B. A., & Islam, R. (2019). Evaluating malaysia’s fuel diversification strategies 1981–2016. *Energy Policy*, 111083.
- Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F., & Menardo, S. (2010). Evaluation of the biogas productivity potential of some italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology*, *101*(10), 3780–3783.
- Duman, G., Okutucu, C., Ucar, S., Stahl, R., & Yanik, J. (2011). The slow and fast pyrolysis of cherry seed. *Bioresource Technology*, *102*(2), 1869–1878.
- Elmaz, F., Özgün Yücel, & Mutlu, A. Y. (2019). Predictive modeling of biomass gasification with machine learning-based regression methods. *Energy*, 116541.
- Eom, I.-Y., Kim, J.-Y., Lee, S.-M., Cho, T.-S., Yeo, H., & Choi, J.-W. (2013). Comparison of pyrolytic products produced from inorganic-rich and demineralized rice straw (*oryza sativa* l.) by fluidized bed pyrolyzer for future biorefinery approach. *Bioresource technology*, *128*, 664–672.
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogota: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Escalante H, H., Guzmán L, C., & Castro M, L. (2014). Anaerobic digestion of fique bagasse: an energy alternative. *Dyna*, *81*(183), 74–85.

- Fagbohunge, M. O., Herbert, B. M., Hurst, L., Li, H., Usmani, S. Q., & Semple, K. T. (2016). Impact of biochar on the anaerobic digestion of citrus peel waste. *Bioresource technology*, *216*, 142–149.
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel*, *82*(7), 835–842.
- Fu, Q., Huang, Y., Niu, M., Yang, G., & Shao, Z. (2014). Experimental and predicted approaches for biomass gasification with enriched air–steam in a fluidised bed. *Waste Management & Research*, *32*(10), 988–996.
- Galí, A., Benabdallah, T., Astals, S., & Mata-Alvarez, J. (2009). Modified version of adm1 model for agro-waste application. *Bioresource Technology*, *100*(11), 2783–2790.
- Godin, B., Lamaudière, S., Agneessens, R., Schmit, T., Goffart, J.-P., Stilmant, D., Gerin, P., & Delcarte, J. (2013). Chemical composition and biofuel potentials of a wide diversity of plant biomasses. *Energy and Fuels*, *27*(5), 2588–2598.
- Gunaseelan, V. N. (2007). Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresource technology*, *98*(6), 1270–1277.
- Heo, H. S., Park, H. J., Dong, J.-I., Park, S. H., Kim, S., Suh, D. J., Suh, Y.-W., Kim, S.-S., & Park, Y.-K. (2010). Fast pyrolysis of rice husk under different reaction conditions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *16*(1), 27–31.
- Islam, M. N., Zailani, R., & Ani, F. N. (1999). Pyrolytic oil from fluidised bed pyrolysis of oil palm shell and its characterisation. *Renewable Energy*, *17*(1), 73–84.
- Jacob, S. & Banerjee, R. (2016). Modeling and optimization of anaerobic codigestion of potato waste and aquatic weed by response surface methodology and artificial neural network coupled genetic algorithm. *Bioresource technology*, *214*, 386–395.
- Jagadabhi, P. S., Kaparaju, P., & Rintala, J. (2011). Two-stage anaerobic digestion of tomato, cucumber, common reed and grass silage in leach-bed reactors and upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Bioresource technology*, *102*(7), 4726–4733.
- Jenkins, B., Baxter, L., & Miles, T. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel processing technology*, *54*(1), 17–46.

- Jiang, D., Zhuang, D., Fu, J., Huang, Y., & Wen, K. (2012). Bioenergy potential from crop residues in china: Availability and distribution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(3), 1377 – 1382.
- Jung, S.-H., Kang, B.-S., & Kim, J.-S. (2008). Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *82*(2), 240–247.
- Kaewluan, S. & Pipatmanomai, S. (2011). Gasification of high moisture rubber wood-chip with rubber waste in a bubbling fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, *92*(3), 671–677.
- Kang, B.-S., Lee, K. H., Park, H. J., Park, Y.-K., & Kim, J.-S. (2006). Fast pyrolysis of radiata pine in a bench scale plant with a fluidized bed: Influence of a char separation system and reaction conditions on the production of bio-oil. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, *76*(1), 32–37.
- Karimi Alavijeh, M. & Yaghmaei, S. (2016). Biochemical production of bioenergy from agricultural crops and residue in iran. *Waste Management*, *52*, 375–394.
- Karmakar, M. & Datta, A. (2011). Generation of hydrogen rich gas through fluidized bed gasification of biomass. *Bioresource technology*, *102*(2), 1907–1913.
- Kayhanian, M., Tchobanoglous, G., & Brown, R. C. (2007). Biomass conversion processes for energy recovery. *Handbook of energy efficiency and renewable energy*. Taylor and Francis Group, 25–4.
- Kim, S.-J., Jung, S.-H., & Kim, J.-S. (2010). Fast pyrolysis of palm kernel shells: influence of operation parameters on the bio-oil yield and the yield of phenol and phenolic compounds. *Bioresource technology*, *101*(23), 9294–9300.
- Kim, S. W., Koo, B. S., Ryu, J. W., Lee, J. S., Kim, C. J., Lee, D. H., Kim, G. R., & Choi, S. (2013). Bio-oil from the pyrolysis of palm and jatropha wastes in a fluidized bed. *Fuel processing technology*, *108*, 118–124.
- Korres, N., O’Kiely, P., Benzie, J. A., & West, J. S. (2013). *Bioenergy production by anaerobic digestion: using agricultural biomass and organic wastes*. Routledge.

- Kythreotou, N., Florides, G., & Tassou, S. A. (2014). A review of simple to scientific models for anaerobic digestion. *Renewable Energy*, *71*, 701–714.
- Lahijani, P. & Zainal, Z. A. (2011). Gasification of palm empty fruit bunch in a bubbling fluidized bed: a performance and agglomeration study. *Bioresource Technology*, *102*(2), 2068–2076.
- Lauwers, J., Appels, L., Thompson, I. P., Degrève, J., Van Impe, J. F., & Dewil, R. (2013). Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations. *Progress in Energy and Combustion Science*, *39*(4), 383–402.
- Lee, S.-H., Eom, M.-S., Yoo, K.-S., Kim, N.-C., Jeon, J.-K., Park, Y.-K., Song, B.-H., & Lee, S.-H. (2008). The yields and composition of bio-oil produced from quercus acutissima in a bubbling fluidized bed pyrolyzer. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *83*(1), 110–114.
- Li, C., Liu, G., Nges, I. A., Deng, L., Nistor, M., & Liu, J. (2016). Fresh banana pseudo-stems as a tropical lignocellulosic feedstock for methane production. *Energy, Sustainability and Society*, *6*(1), 27.
- Li, X., Grace, J., Lim, C., Watkinson, A., Chen, H., & Kim, J. (2004). Biomass gasification in a circulating fluidized bed. *Biomass and bioenergy*, *26*(2), 171–193.
- Li, Y., Merrettig-Bruns, U., Strauch, S., Kabasci, S., & Chen, H. (2015). Optimization of ammonia pretreatment of wheat straw for biogas production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *90*(1), 130–138.
- Liang, S. & McDonald, A. G. (2015). Anaerobic digestion of pre-fermented potato peel wastes for methane production. *Waste Management*, *46*, 197–200.
- Lim, C. H. & Lam, H. L. (2016). Biomass supply chain optimisation via novel biomass element life cycle analysis (belca). *Applied Energy*, *161*, 733–745.
- Lira, C. S., Berruti, F. M., Palmisano, P., Berruti, F., Briens, C., & Pécora, A. A. (2013). Fast pyrolysis of amazon tucumã (*astrocaryum aculeatum*) seeds in a bubbling fluidized bed reactor. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, *99*, 23–31.

- Liu, Y., Dong, J., Liu, G., Yang, H., Liu, W., Wang, L., Kong, C., Zheng, D., Yang, J., Deng, L., et al. (2015). Co-digestion of tobacco waste with different agricultural biomass feedstocks and the inhibition of tobacco viruses by anaerobic digestion. *Bioresource technology*, *189*, 210–216.
- Loha, C., Chattopadhyay, H., & Chatterjee, P. K. (2013). Energy generation from fluidized bed gasification of rice husk. *Journal of renewable and sustainable energy*, *5*(4), 043111.
- Lv, P., Chang, J., Xiong, Z., Huang, H., Wu, C., Chen, Y., & Zhu, J. (2003). Biomass air- steam gasification in a fluidized bed to produce hydrogen-rich gas. *Energy & fuels*, *17*(3), 677–682.
- Malik, S., Qasim, M., Saeed, H., Chang, Y., & Taghizadeh-Hesary, F. (2020). Energy security in pakistan: Perspectives and policy implications from a quantitative analysis. *Energy Policy*, *144*, 111552.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, *83*(1), 37–46.
- Mikulandrić, R., Lončar, D., Böhning, D., Böhme, R., & Beckmann, M. (2014). Artificial neural network modelling approach for a biomass gasification process in fixed bed gasifiers. *Energy Conversion and Management*, *87*, 1210 – 1223.
- Monlau, F., Sambusiti, C., Barakat, A., Guo, X. M., Latrille, E., Trably, E., Steyer, J.-P., & Carrere, H. (2012). Predictive models of biohydrogen and biomethane production based on the compositional and structural features of lignocellulosic materials. *Environmental science & technology*, *46*(21), 12217–12225.
- Mussatto, S. I., Fernandes, M., Milagres, A. M., & Roberto, I. C. (2008). Effect of hemicellulose and lignin on enzymatic hydrolysis of cellulose from brewer's spent grain. *Enzyme and Microbial Technology*, *43*(2), 124–129.
- Nair, V. V., Dhar, H., Kumar, S., Thalla, A. K., Mukherjee, S., & Wong, J. W. (2016). Artificial neural network based modeling to evaluate methane yield from biogas in a laboratory-scale anaerobic bioreactor. *Bioresource technology*, *217*, 90–99.
- Natarajan, E. & Sethupathy, S. B. (2015). Gasification of groundnut shells. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *37*, 980–986.

- Nizami, A.-S., Korres, N. E., & Murphy, J. D. (2009). Review of the integrated process for the production of grass biomethane. *Environmental science & technology*, *43*(22), 8496–8508.
- Oleszek, M., Król, A., Tys, J., Matyka, M., & Kulik, M. (2014). Comparison of biogas production from wild and cultivated varieties of reed canary grass. *Bioresource technology*, *156*, 303–306.
- Orrego, J., Cabanzo Hernández, R., & Mejía-Ospino, E. (2010). Structural study of colombian coal by fourier transform infrared spectroscopy coupled to attenuated total reflectance (FTIR-ATR). *Revista mexicana de física*, *56*, 251 – 254.
- Pandey, D. S., Das, S., Pan, I., Leahy, J. J., & Kwapinski, W. (2016). Artificial neural network based modelling approach for municipal solid waste gasification in a fluidized bed reactor. *Waste management*, *58*, 202–213.
- Panwar, N., Kothari, R., & Tyagi, V. (2012). Thermo chemical conversion of biomass–eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(4), 1801–1816.
- Parawira, W., Murto, M., Zvauya, R., & Mattiasson, B. (2004). Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy*, *29*(11), 1811–1823.
- Park, H., Dong, J.-I., Jeon, J.-K., Park, Y.-K., Yoo, K.-S., Kim, S.-S., Kim, J., & Kim, S. (2008). Effects of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of japanese larch. *Chemical Engineering Journal*, *143*(1-3), 124–132.
- Park, H., Park, Y.-K., Dong, J.-I., Kim, J.-S., Jeon, J.-K., Kim, S.-S., Kim, J., Song, B., Park, J., & Lee, K.-J. (2009). Pyrolysis characteristics of oriental white oak: Kinetic study and fast pyrolysis in a fluidized bed with an improved reaction system. *Fuel Processing Technology*, *90*(2), 186–195.
- Park, H., Park, Y.-K., & Kim, J. (2008). Influence of reaction conditions and the char separation system on the production of bio-oil from radiata pine sawdust by fast pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, *89*(8), 797–802.
- Pattiya, A. (2011). Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresource Technology*, *102*(2), 1959–1967.

- Pattiya, A. & Suttibak, S. (2012). Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *95*, 227–235.
- Prestipino, M., Chiodo, V., Maisano, S., Zafarana, G., Urbani, F., & Galvagno, A. (2017). Hydrogen rich syngas production by air-steam gasification of citrus peel residues from citrus juice manufacturing: Experimental and simulation activities. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(43), 26816–26827.
- Puig-Arnabat, M., Hernández, J. A., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2013). Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers. *biomass and bioenergy*, *49*, 279–289.
- Rabemanolontsoa, H. & Saka, S. (2012). Holocellulose determination in biomass. *Green Energy and Technology*, *108*, 135–140.
- Saidur, R., Abdelaziz, E., Demirbas, A., Hossain, M., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and sustainable energy reviews*, *15*(5), 2262–2289.
- Sarker, S., Arauzo, J., & Nielsen, H. K. (2015). Semi-continuous feeding and gasification of alfalfa and wheat straw pellets in a lab-scale fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management*, *99*, 50–61.
- Sharma, A., Pareek, V., Wang, S., Zhang, Z., Yang, H., & Zhang, D. (2014). A phenomenological model of the mechanisms of lignocellulosic biomass pyrolysis processes. *Computers & Chemical Engineering*, *60*, 231 – 241.
- Soysa, R., Choi, S., Jeong, Y., Kim, S., & Choi, Y. (2015). Pyrolysis of douglas fir and coffee ground and product biocrude-oil characteristics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *115*, 51–56.
- Subramanian, P., Sampathrajan, A., & Venkatachalam, P. (2011). Fluidized bed gasification of select granular biomaterials. *Bioresource technology*, *102*(2), 1914–1920.
- Sukhesh, M. & Rao, P. (2018). Anaerobic digestion of crop residues: Technological developments and environmental impact in the indian context. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *16*, 513–528. cited By 2.

- Sulaiman, F. & Abdullah, N. (2011). Optimum conditions for maximising pyrolysis liquids of oil palm empty fruit bunches. *Energy*, *36*(5), 2352–2359.
- Sun, Y., Liu, L., Wang, Q., Yang, X., & Tu, X. (2016). Pyrolysis products from industrial waste biomass based on a neural network model. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, *120*, 94–102.
- Suttibak, S., Sriprateep, K., & Pattiya, A. (2015). Production of bio-oil from pine sawdust by rapid pyrolysis in a fluidized-bed reactor. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, *37*(13), 1440–1446.
- Thomsen, S. T., Spliid, H., & Østergård, H. (2014). Statistical prediction of biometane potentials based on the composition of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, *154*, 80–86.
- Triolo, J. M., Pedersen, L., Qu, H., & Sommer, S. G. (2012). Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource technology*, *125*, 226–232.
- Triolo, J. M., Sommer, S. G., Møller, H. B., Weisbjerg, M. R., & Jiang, X. Y. (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource technology*, *102*(20), 9395–9402.
- Vivekanand, V., Ryden, P., Horn, S. J., Tapp, H. S., Wellner, N., Eijsink, V. G., & Waldron, K. W. (2012). Impact of steam explosion on biogas production from rape straw in relation to changes in chemical composition. *Bioresource Technology*, *123*, 608–615.
- Ward-Doria, M., Arzuaga-Garrido, J., Ojeda, K., & Sánchez, E. (2016). Production of biogas from acid and alkaline pretreated cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of ChemTech Research*, *9*(11), 252–260.
- Wongsiriamnuay, T., Kannang, N., & Tippayawong, N. (2013). Effect of operating conditions on catalytic gasification of bamboo in a fluidized bed. *International Journal of Chemical Engineering*, *2013*, 1–9.

- Wu, S.-R., Chang, C.-C., Chang, Y.-H., & Wan, H.-P. (2016). Comparison of oil-tea shell and douglas-fir sawdust for the production of bio-oils and chars in a fluidized-bed fast pyrolysis system. *Fuel*, *175*, 57–63.
- Xavier, C. A. N., Moset, V., Wahid, R., & Møller, H. B. (2015). The efficiency of shredded and briquetted wheat straw in anaerobic co-digestion with dairy cattle manure. *Biosystems Engineering*, *139*, 16–24.
- Xie, S., Hai, F. I., Zhan, X., Guo, W., Ngo, H. H., Price, W. E., & Nghiem, L. D. (2016). Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization. *Bioresource technology*, *222*, 498–512.
- Yanik, J., Kornmayer, C., Saglam, M., & Yüksel, M. (2007). Fast pyrolysis of agricultural wastes: Characterization of pyrolysis products. *Fuel Processing Technology*, *88*(10), 942–947.
- Yong, Z., Dong, Y., Zhang, X., & Tan, T. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy*, *78*, 527–530.
- Zhang, C., Zhang, R., Li, X., Li, Y., Shi, W., Ren, X., & Xu, X. (2011). Bench-scale fluidized-bed fast pyrolysis of peanut shell for bio-oil production. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, *30*(1), 11–18.
- Zhang, H., Xiao, R., Huang, H., & Xiao, G. (2009). Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor. *Bioresource Technology*, *100*(3), 1428–1434.

3

Residuos agrícolas: Potencial regional & red de suministro

Como una de las regiones agrícolas más representativas del país, Santander posee un alto potencial para la producción de energía a partir de los residuos de cultivos. En orden de aprovechar estos recursos adecuadamente, es esencial identificar su distribución geográfica, el grado de dispersión en el territorio y la factibilidad para su recolección. Con este fin, en este capítulo se proporciona una descripción del potencial disponible para la producción de bioenergía a partir de los residuos agrícolas en Santander. La evaluación considera tanto la cantidad disponible teóricamente como el potencial energético. Los cálculos están basados en coeficientes estadísticos de las relaciones residuo-producto (RPR) y niveles de disponibilidad, determinados en campo para cada recurso en específico con base en el tipo de cultivo y el rendimiento. Información base que permite derivar los costos asociados a la cadena de suministro.

3.1. Introducción

Los residuos agrícolas representan recursos energéticos heterogéneos y geográficamente distribuidos (Hiloidhari & Baruah; 2011). A diferencia de los combustibles fósiles, estos experimentan una gran variabilidad en términos de explotación, disponibilidad y propiedades físico-químicas (Scarlat et al.; 2010). No obstante, la creciente demanda de energía y los riesgos asociados con el cambio climático antropogénico han estimulado la investigación en recursos energéticos alternativos. Desde esta perspectiva, proyectos de generación de energía eléctrica y producción de biocombustibles a partir de residuos

agrícolas han sido clasificados como estratégicos en los planes energéticos de distintos países (Kukrety et al.; 2015), incluido Colombia (UPME; 2015).

Una de las principales barreras para el desarrollo de proyectos basados en biomasa es la falta de conocimiento sobre el potencial de los recursos disponible (Al-Hamamre et al.; 2014, 2017; González-García et al.; 2014). La disponibilidad y oferta de los residuos agrícolas como recursos energéticos renovables puede variar de acuerdo a las condiciones de la zona de estudio. Una estimación de la cantidad disponible proporciona información base para la ubicación y dimensionalización de una planta de bioenergía (Iye & Bilsborrow; 2013). No obstante, la diversidad de prácticas agrícolas, condiciones climáticas, características edafológicas del suelo y usos no energéticos alternativos hacen que la evaluación del potencial energético de estos residuos sea compleja (Hiloidhari et al.; 2014). Asimismo, otros obstáculos importantes son los relativamente altos costos de inversión para los sistemas de alimentación de biomasa, la incertidumbre en la seguridad del suministro debido a las variaciones estacionales y la limitada infraestructura tecnológica actual (Giuliano et al.; 2016; Duku et al.; 2011).

Santander presenta un amplio conjunto de condiciones agroecológicas que permiten la producción de una amplia gama de cultivos y sistemas agrícolas. Además, posee grandes diferencias en términos de superficie cultivada, tipos de cultivo y rendimiento. Si se espera que los residuos agrícolas desempeñen un papel significativo en la diversificación de la canasta energética regional, se necesitan generar parámetros estadísticos con la ayuda de mediciones sobre el terreno (Bentsen et al.; 2014). Los rendimientos de los cultivos dependen de condiciones agroecológicas locales específicas, técnicas de cultivo, etc. Los rendimientos de los residuos de cultivos son incluso más variables y dependen de factores como las técnicas de cosecha y altura de corte (Summers et al.; 2003).

Todo lo anterior pone de manifiesto la complejidad del tema e indica la dirección donde deben realizarse los esfuerzos. Por tanto, y dada la hipótesis de que los residuos agrícolas tienen una amplia dispersión territorial y variabilidad temporal, y su recolección, transporte y almacenamiento representan una parte crítica en la etapa de planificación en la medida en que afecta los costos, es imperativo considerar una evaluación correcta de su potencial a partir del conocimiento detallado de la región de estudio y en función de la topología de la cadena de suministro a considerar (Paiano & Lagioia; 2016).

Cualquier proyecto de bioenergía descentralizada requeriría, en primera instancia, un mapeo preciso de los recursos disponibles. Al respecto, muchos autores han informado

sobre el uso del Sistema de información geográfica (SIG), tanto en la evaluación y planificación de recursos de biomasa (Hiloidhari & Baruah; 2011; Voivontas et al.; 2001; Singh et al.; 2008), como en la construcción de la cadena de suministro (Sultana & Kumar; 2012; Zhang et al.; 2017; Aalto et al.; 2019). En este sentido, y al centrarnos en la infraestructura de transporte como soporte, es posible entender que las características físicas y operacionales de la vía constituyen factores importantes y de gran utilidad para orientar las decisiones en materia de inversión y localización de nuevos proyectos de infraestructura y equipamientos. Por tal razón, estudiar la topología de la red de suministro es, a priori, fundamental para garantizar un adecuado suministro de materias primas de biomasa a precios competitivos.

De este modo, los dos objetivos principales de esta investigación son: (1) Determinar la producción potencial de biomasa a partir de los residuos agrícolas proveniente de los cultivos más representativos de Santander; (2) Presentar la metodología de evaluación de la accesibilidad y los costos asociados a la cadena de suministro teniendo en cuenta la red de carreteras y la distribución espacial de la biomasa.

3.2. Metodología

3.2.1. Etapa 1: Evaluación del potencial energético

La evaluación del potencial de biomasa procedente de los residuos de la actividad agrícola fue realizada a partir de las estadísticas proporcionadas por la secretaria de agricultura y desarrollo rural de Santander. Las estadísticas agropecuarias presentan información anualizada que relaciona el área sembrada, el área cosechada, la producción obtenida, y el rendimiento estimado para cada especie vegetal cultivada de forma permanente, anual o transitoria.

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) genera las estadísticas sectoriales a nivel departamental y nacional, integrando procesos de validación y análisis de consistencia de la información sectorial. Esta tarea se realiza con la participación de los diferentes representantes de las actividades productivas del sector agropecuario a nivel municipal y departamental, como lo son las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA), Secretarías de Agricultura o de Planeación, Centros Provinciales de Gestión Agro–empresarial, comités regionales de productores, cadenas productivas regionales y en general todas aquellas instituciones públicas y/o privadas

que cuenten con información de las variables asociadas a la oferta productiva agropecuaria a nivel municipal y departamental.

En el presente estudio, la evaluación del potencial energético considera cuatro fases principales a saber:

- **Fase 1:** Identificación de la biomasa disponible en la región de Santander en términos de tipos y especies de biomasa, períodos de cosecha y localización geográfica.
- **Fase 2:** Determinación de los coeficientes estadísticos de evaluación de la biomasa residual agrícola, la relación producto–residuo para cada especie y su factor de disponibilidad.
- **Fase 3:** Cálculo del potencial energético de acuerdo a la cantidad estimada de residuos de biomasa disponibles y su poder calorífico.
- **Fase 4:** Determinación de las zonas agrícolas de mayor intensidad de producción para cada especie de biomasa mediante análisis espacial.

3.2.1.1. Identificación y Selección de los Cultivos

Como base para la identificación y selección de los cultivos más representativos de Santander se adoptó un conjunto de criterios de decisión que buscan garantizar, a partir del conocimiento socio–económico de la zona de estudio, la participación de aquellos cultivos estratégicos y de interés regional. Como criterios de decisión se tienen: su contribución al desarrollo regional, su significativo impacto en la productividad y competitividad agropecuaria en las zonas donde su participación económica es predominante, su productividad, tradicionalidad, área cosechada e idoneidad para su aprovechamiento energético. Esta fase se asoció con la creación de una base de datos geo–referenciada con la superficie cultivada y la productividad de todas las especies identificadas en el departamento.

En total, se han seleccionado 23 cultivos que generan 67 tipos de residuos diferentes, derivados de la cosecha y su posterior transformación. Estos se agrupan en dos categorías principales: residuos agrícolas de cosecha (RAC) y residuos agroindustriales (RAI). Los RAC permanecen en el campo donde se cosecha el producto mientras los RAI se crean en un lugar de fácil acceso, donde se procesa el producto.

3.2.1.2. Determinación del Factor Producto–Residuo y Disponibilidad

La relación producto–residuo (F_R) indica el peso del residuo producido por unidad de cultivo. Por lo tanto, un F_R de 1.0 indica que habrá una tonelada de residuo por cada tonelada de cultivo. El procedimiento desarrollado en este estudio para la determinación de este factor fue el siguiente:

- De acuerdo a las estadísticas agropecuarias, se identificó para cada cultivo, el municipio y la zona de mayor producción. En cada una de estas zonas se solicitó autorización a los agricultores y/o entidades locales responsables para acceder a los cultivos.
- De acuerdo a su extensión, cada uno de los cultivos fue dividido en un número determinado de parcelas que a su vez fue subdividido en subparcelas de 10 metros de lado para cultivos transitorios y 20 metros de lado para cultivos permanentes. Se seleccionaron al azar 10 subparcelas y en cada una de ellas se recogieron muestras de los residuos de forma aleatoria.
- El producto principal de cada cultivo fue recolectado para cada una de las subparcelas seleccionadas, registrando tanto el peso del producto como el peso del residuo.

El Factor residuo–producto fue calculado entonces como el cociente del peso del residuo (W_R) por el peso del producto principal (W_P). De forma que:

$$F_R = \frac{W_R}{W_P} \quad (3.1)$$

Por otro lado, la disponibilidad de residuos agrícolas es un factor crítico a considerar al momento de evaluar su potencial como materia prima energética. La disponibilidad condiciona la cantidad de residuos técnicamente disponibles dado los usos competitivos existentes. A partir de entrevistas realizadas al personal y/o técnicos agropecuarios, se estima la cantidad de residuos retenido en el campo como fuente de nutriente o para prevenir la erosión, la cantidad que es utilizada como alimento animal o que tiene algún otro uso específico en las comunidades agropecuarias. Así, mediante sustracción entre estos flujos, se busca cuantificar el porcentaje de residuos que no tienen uso actual o se encuentran subutilizados y desviarlos hacia su aprovechamiento energético.

3.2.1.3. Estimación del potencial energético

El potencial energético de los residuos agrícolas se estimó sobre la base de la producción agrícola de cada cultivo, el factor producto–residuo y el factor de disponibilidad. Dado que la variación en la producción de cultivos se produce de una región a otra y de una temporada a otra, la producción anual promedio de cultivos (en términos de superficie cultivada, rendimiento y producción total) se determinó para los años 2002–2020. Lo anterior, en orden de estudiar y reducir la variación temporal y geográfica en los datos de producción que pueden ocurrir de año en año y, por lo tanto, tendrían un impacto en el suministro de residuos agrícolas. La metodología general para la estimación de la oferta de biomasa se calcula mediante la Ecuación (3.2) (Escalante et al.; 2011):

$$B_k^{[j]} = F_D \times F_R \times P_k^{[j]} \quad (3.2)$$

donde $B_k^{[j]}$ representa la cantidad de residuo k disponible en el municipio j (t/año), F_D es el factor de disponibilidad, F_R es la relación producto residuo, $P_k^{[j]}$ representa la producción anual del producto principal en el municipio j (t/year).

El potencial energético para cada residuo disponible fue evaluado usando la Ecuación (3.3). El potencial energético representa el contenido de energía de la biomasa que podría estar disponible técnicamente para su aprovechamiento.

$$E_k = (1 - M_k) \times LHV_k \times \sum B_k^{[j]} \quad (3.3)$$

donde E_k representa el potencial energético del residuo k , M_k el contenido de humedad, y LHV_k el poder calorífico inferior.

Al finalizar esta etapa, se elaboró mapas de coropletas para representar la distribución de las variables. En estos, las unidades administrativas (en este caso municipios) se colorean en función del valor de la variable que contengan.

3.2.1.4. Análisis de las estadísticas de vecindad

Una vez cuantificada la oferta y el potencial energético de los residuos agrícolas disponibles y obtenida su distribución geográfica a nivel regional, se procede a localizar aquellas zonas con mayor concentración del recurso por unidad de área, tomando como

referencia una distancia máxima de recolección y transporte. Este análisis está basado en las estadísticas locales de vecindad inmediata y fue ejecutado en orden de estudiar la interrelación espacial y producir un mapa en el cual se eliminan los límites entre tipos de rasgos. La metodología incluye una escala de comparación de seis niveles para la evaluación de posibles alternativas, en las que la distribución de biomasa residual varía de “muy disperso” a “altamente concentrado”. Los límites de las categorías fueron determinados por el método de clasificación según los umbrales naturales de Jenks (rupturas naturales). Este es un método de agrupación de datos que identifica grupos y patrones de datos en un conjunto definiendo los puntos de separación entre los valores de frecuencia y minimizando la varianza en cada clase (Jenks; 1967).

Para cada celda de $0.1 \times 0.1 \text{ km}^2$ en el ráster de entrada, el análisis de vecindad calcula una estadística basada en el valor de la celda de procesamiento y el valor de las celdas dentro de un vecindario específico, luego envía este valor a la ubicación de celda correspondiente en el ráster de salida. El valor de entrada es la cantidad de residuos disponibles, la vecindad se establece para un radio de acción entre 5–25km, el estadístico seleccionado es la suma, es decir, realiza la adición de la oferta de cada celda (celdas vecinas y celda focal). Como resultado, en cada celda del ráster de salida, se presenta la cantidad máxima de biomasa disponible en un radio de acción. El radio de acción o de acopio utilizado debe ser apropiado para el área de estudio: en el extremo inferior del rango, el tamaño del radio debe ser lo suficientemente grande como para abarcar los puntos de datos suficientes para que las estadísticas sean válidas, mientras que en el extremo superior se debe evitar una ventana tan grande que abarque todos los puntos de datos a la vez y terminemos con una estadística global en lugar de local.

3.2.2. Etapa 2: Análisis de accesibilidad geográfica

3.2.2.1. Localización de puntos hipotéticos de Biomasa

La selección del sitio de instalación de una planta de bioenergía debe considerar los costos asociados con la recolección y el transporte como factores neurálgicos en la etapa de planificación (Singh et al.; 2010; Asadullah; 2014). Así, y como enfoque metodológico, se asumen localizaciones ficticias donde es posible instalar una planta de conversión o un punto de recolección. Estas localizaciones se definen en este estudio como puntos hipotéticos de biomasa (PB) y presentan dos características: (1) Se encuentran distribuidos en intervalos cuasi-uniformes a lo largo de la red de carreteras de la zona de

estudio y (2) tienen asociado una oferta de biomasa (ver sección 3.2.3.1). Asimismo, cada BP representa una alternativa en el modelo de decisión; discutido más adelante en el capítulo (4).

Se utilizó el algoritmo de Visvalingam–Whyatt presentado por García Balboa & Ariza López (2009) en orden de obtener una segmentación adecuada de la red de transporte, como proceso de generalización cartográfica basado en el reconocimiento de patrones de sinuosidad, dado que las características de la red de transporte no son constantes u homogéneas a lo largo de toda su dimensión. El algoritmo de Visvalingam–Whyatt busca garantizar la ubicación del conjunto de PB, cada uno a una distancia promedio de 25 kilómetros del siguiente mas cercano, y una red de transporte entre par de puntos lo más homogénea posible en sus características.

3.2.2.2. Modelo de accesibilidad geográfica

En este estudio, el análisis de accesibilidad geográfica se encuentra soportado por la aplicación de modelos geo–estadísticos a la infraestructura de transporte y está orientado en general hacia las áreas rurales. Así, la accesibilidad se define en relación al concepto de ruralidad, al representar la capacidad de una sociedad, entendida como conjunto de individuos, instituciones e infraestructuras, de desplazarse y llegar a otros lugares de manera eficiente y económica (Caschili et al.; 2015). En este sentido, los lugares remotos generalmente son difícilmente accesibles porque están limitados negativamente por los altos costos de viaje. Establecer las medidas de conexión permiten establecer la relación y los vínculos entre dos nodos (localizaciones) específicos. Así, el cálculo de un índice de accesibilidad se realiza calculando la ruta más eficiente (en términos de tiempo o distancia) entre un nodo específico i y demás puntos j de interés de la red, lo anterior en orden de construir una matriz simétrica y unimodal (\mathbf{M}) derivada de estas observaciones. A partir de la información contenida en esta matriz, y conociendo las características de la red de transporte en cuanto a su velocidad media de diseño, capacidad, longitud, tipo de vía y restricciones de operación, se calcula el vector de tiempos promedios de viaje (\mathbf{t}), en el que cada elemento representa un nodo de la red, calculado mediante:

$$t_i = \frac{1}{(N-1)(n-1)} \left[(N-1) \sum_{i=1}^N t_{v(i-j)} + (n-1) \sum_{i=1}^n t_{v(i-p)} \right] \quad (3.4)$$

donde $t_{v(i-j)}$ es el tiempo mínimo de viaje entre el nodo i y el nodo j ; $t_{v(i-p)}$ es el tiempo mínimo de viaje entre el nodo i y el centro de interés (infraestructura de agua, electricidad, potencia, gas, capital municipal o asentamiento rural) p ; n es el número de nodos; N es el número de puntos de interés.

Dadas las necesidades de investigación, cada nodo representa una planta hipotética de biomasa, y por ende, cada elemento del vector \mathbf{t} representa la accesibilidad hacia esas localizaciones específicas, en virtud de mejores estadíos de conectividad con el territorio en general. Así, el elemento i del vector \mathbf{t} con menor valor es el mejor comunicado.

3.2.3. Etapa 3: Diseño de la cadena de suministros

3.2.3.1. Regionalización basada en polígonos

En orden de realizar una regionalización definida y parametrizada, en este estudio se ha implementado un método de agrupamiento jerárquico, agregativo y espacialmente restringido, a partir de los polígonos proximales de Thiessen como unidades taxonómicas operativas (OTU). Los polígonos de Thiessen permiten la identificación de áreas de cobertura y regiones de influencia en el espacio, y por lo tanto se aplica a problemas como la ubicación de las instalaciones y la zonificación (Richter et al.; 2019). Lo que se busca es dividir el área de producción en subregiones (teselación) y asociar a esa subregión una cantidad de biomasa disponible de acuerdo a la oferta calculada (sección 3.2.1). Este método define un área alrededor de un punto p_i , donde cada ubicación está más cerca de este punto que de todas las demás; matemáticamente se define a partir de la Ec. 3.5 (Mu; 2009):

$$T(P_i) = \{x \mid d_e(x, p_i) \leq d_e(x, p_j) \quad \forall j, j \neq i \ \& \ i, j \leq n\} \quad (3.5)$$

donde P representa un conjunto finito de puntos en el plano euclidiano, $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ para todo $2 \leq n < \infty$. $d_e(x, p_i)$ es la distancia euclidiana entre x y p_i ; $d_e(x, p_j)$ es la distancia euclidiana entre x y p_j ; x denota cualquier localización en el plano, y $T(P_i)$ denota el polígono de Thiessen (Voronoi) del punto p_i .

Así, cada PB se asoció con una región espacial que tiene una cantidad fija de recursos y cuya dispersión geográfica se considera constante a efectos de evaluación de costos. De esta forma se podría aproximar el coste real de recolección y transporte de la biomasa hasta la planta asignada según su localización.

3.2.3.2. Modelo de costos de recolección

El costo de recolección es el costo representado de trasladar el residuo agrícola desde las zonas de cultivo, donde se encuentran en forma dispersa, hasta los puntos hipotéticos de biomasa utilizados como centros de acopio dentro de la cadena de suministro. Los costos de recolección dependen de la densidad espacial del residuo en la región y al área donde se recuperan. En la sección inmediatamente anterior se han definido las áreas de recolección mediante el uso de polígonos de Thiessen. Es posible entonces aproximar los costos de recolección utilizando esta regionalización bajo los siguientes supuestos:

- Los residuos agrícola se distribuyen uniformemente dentro del área delimitada por cada polígono. Esta suposición es una aproximación a la situación real que permite asignar a cada PB, como centro del polígono, una oferta de biomasa, y así calcular directamente los costos de recolección y/o transporte.
- No existe una correlación definida entre el área del polígono y el alcance de las actividades de producción agrícola. Sin embargo, el tamaño del polígono puede reflejar problemas accesibilidad y dinámicas de intercambio territorial.
- Los residuos agrícolas se recolectan después de un corto período de secado en campo. Sin embargo, debido a la situación actual de las carreteras que conectan a los sectores rurales y los centros de almacenamiento y acopio, se utilizan sitios de almacenamiento locales.

En este sentido y bajo estos preceptos, el costo de recolección se calcula a partir de:

$$C_{R_j}^{[k]} = \frac{C_{FR} \cdot B_k^{[j]}}{A_j} \quad (3.6)$$

donde C_{FR} representa el costo fijo de recolección de los residuos por unidad de área, $\text{US\$} \cdot t^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, $B_k^{[j]}$ es la oferta de biomasa k en el polígono j , y A_j es el área de recolección marcada por el área del polígono j donde se realiza la actividad.

3.2.3.3. Caracterización de las unidades de transporte

La elección de la unidad de transporte se realizó sobre la base presentada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el documento técnico

“Metodología General Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera” y la resolución 20123040034405 de agosto del 2021 expedida por el ministerio de transporte. Ambos documentos configuran herramientas que contienen los parámetros mediante los cuales se debe medir o calcular los costos de la operación de transporte de acuerdo con las características propias de cada viaje, e incluyen una tabla de costos para operar varios tipos de camiones; datos utilizados en la construcción de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Costos de Transporte según parque automotor

ID	Descripción	Peso máximo (t)	Capacidad vehículo (m^3)	Costo de transporte ($US\$ \cdot t^{-1} \cdot km^{-1}$)	Costo de carga/descarga ($US\$ \cdot Viaje^{-1}$)
C ₂	Camión rígido 2 Ejes	9	32	0.077	0.077
C ₃	Camión rígido 3 Ejes	16	36	0.052	0.052
C _S	Tracto-camión	34	65	0.038	0.038

Aunque la unidad de transporte óptima dependerá exclusivamente de la naturaleza de la carga a transportar y de las características de la red transporte, el estudio antes citado concluye que la configuración más común y que responde de mejor manera a cualquier condición corresponde al camión de dos ejes (C₂), en especial dada la naturaleza rural del problema de transportar residuos agrícolas por carreteras terciarias demasiado estrechas para los camiones pesados.

3.2.3.4. Modelo de Costos de transporte

Los puntos hipotéticos de biomasa, PB, presentados en la etapa anterior, permiten implementar algoritmos de cálculos de distancias, tiempos, y costos de viajes en orden de definir, para un residuo específico, los costos de logística y transporte asociados. El modelo de costo total utiliza las unidades de transporte establecidas anteriormente, junto con las distancias de oferta y demanda y la cantidad de biomasa disponible para calcular el costo total de transporte mediante análisis de redes.

La ubicación de cada PB representa un punto de oferta–demanda ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) con una cantidad fija de recursos disponible. Para el j -ésimo punto de demanda se calcula la distancia real (d_{j-p}) con todos los posibles puntos de suministros p ; teniendo en consideración las características geográficas y de la red de transporte. La cantidad disponible de biomasa luego se suma a través de los puntos de suministro comenzando con la distancia más corta (PB vecinos) hasta que la suma alcance o supere una capa-

cantidad de planta dada (C_T); es decir la cantidad de biomasa necesaria para satisfacer la demanda de la instalación de procesamiento. El número de puntos de suministro que deben considerarse para cumplir esta condición se denomina N . Cuando se cumple esta condición, χ_j se iguala a la suma que se muestra en la Ecuación (3.7):

$$\chi_j = \sum_{I=1}^N \chi_i \quad (3.7)$$

donde χ_i es la cantidad anual de biomasa disponible en el i -ésimo punto de suministro, y χ_j es la cantidad total de biomasa suministrada desde los N puntos de suministro vecinos. Entonces, el costo de transporte asociado con la entrega de la biomasa, desde los puntos de suministro a los puntos de instalación, ahora se puede determinar mediante la Ecuación (3.8)

$$C_{T_i}^{[k]} = C_{FT} \cdot B_k^{[j]} \cdot d_{j-p} + C_{FC} \cdot N_{i-p}^{[k]} \quad (3.8)$$

donde C_{FT} representa el costo fijo de transporte de los residuos, $\text{US\$} \cdot t^{-1} \cdot km^{-1}$, C_{FC} es el costo fijo relacionado a la carga y descarga del residuo de la unidad de transporte, $\text{US\$} \cdot \text{Viaje}^{-1}$, y $N_{i-p}^{[k]}$ es el número total de viajes desde cada punto de evaluación (destino) a cada punto de recuperación de biomasa; calculado a partir de la Ecuación (3.9); multiplicado por dos porque los camiones hacen ida y vuelta.

$$N_{i-p}^{[k]} = 2 \cdot \frac{\chi_i^{[k]}}{\chi_C} \quad (3.9)$$

3.3. Resultados & Discusión

3.3.1. Disponibilidad de los residuos agrícolas

Santander es una región con una economía local y sectorial ampliamente diversificada, con una fuerte tradición agrícola y una población rural muy dispersa dedicada al cultivo de alimentos básicos. Con base en las cifras de producción agrícola (promedio 2002–2020) y teniendo en cuenta solo sus cultivos representativos, el departamento

tiene una producción anual mayor a 1.35 millones de toneladas de producto principal; Caña de panela, palma de aceite, plátano, piña y papa destacan con las más altas producciones.

La Tabla 3.2 presenta los cultivos y los principales residuos generados en Santander, así como su factor producto-residuo (F_R) y factor de disponibilidad (F_D). El factor producto-residuo es el método general que se utiliza para calcular la cantidad generada de cierto residuo o sub-producto en relación a la producción y rendimiento del cultivo o producto agrícola que lo origina. En esta investigación hemos incluido aquellos residuos que, a nuestro entender, presentan un mayor potencial para su aprovechamiento energético y tecnológico; excluyendo así otros tipos de residuos que se generan a partir de estos cultivos. Los valores de F_R determinados en este estudio están dentro del rango de valores informados por otros investigadores. Ejemplo del F_R informado para los residuos de la cascarilla de arroz, el rastrojo del maíz y el raquis de la palma de aceita, los cuales son de 0.20, 0.93 y 1.06, respectivamente.

No obstante, es preciso subrayar que a menudo también se encuentran diferencias importantes en las estimaciones del factor producto-residuo, y estas diferencias pueden justificarse en parte por el hecho de que los rendimientos de residuos son muy variables y dependen de distintos factores, como la variedad de cultivo, el clima, las condiciones del suelo y las estrategias de manejo. Esta variabilidad introduce una incertidumbre en los cálculos que incluso podrían causar cambios de estos valores en el futuro. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que la proyección de la disponibilidad de los residuos en la región asume un F_R fijo para los años de proyección y todo lo que implica esta presunción. En este estudio tampoco se tienen en cuenta datos de producción de residuos generados por el consumidor, en vista de que la recolección de residuos del consumidor no se considera técnicamente factible en la actualidad. También cabe resaltar, que este estudio esta enfocado a muchos residuos que actualmente se encuentran sub-utilizados y que no registran información detallada en la literatura científica, lo que dificulta la comparación con otros estudios pero amplia la información existente en la literatura especializada.

Respecto al factor de disponibilidad, se observan variaciones significativas entre cultivo y cultivo. Sin embargo y como se muestra en la Tabla 3.2, a nivel regional, por lo menos un 45 % del residuo bruto generado está disponible para su aprovechamiento energético. La disponibilidad varía desde un nivel mínimo del 45 % para cultivos como el de la caña de panela hasta un valor máximo del 80 % para el fique. Los residuos de

cultivos se utilizan principalmente como alimento para el ganado, o se dejan sin recolectar en el campo y se queman al aire libre después de la cosecha. Estos residuos también se utilizan para satisfacer las necesidades energéticas domésticas, principalmente como sustitutos de la leña entre la población rural que no está conectada a la red eléctrica y que encuentran fácilmente disponibles estos residuos. La medición de la disponibilidad de residuos del campo y áreas de procesamiento de cultivos es muy difícil debido a la falta de información estadística de generación de residuos y posterior uso. Actualmente, muchos de los residuos agrícolas mencionados apenas se utilizan.

3.3.2. Residuos agrícolas para la producción de bio-energía

La Tabla 3.3 expone un resumen por cultivo del potencial que tiene cada uno para su aprovechamiento energético en virtud de la cantidad máxima que se puede recolectar en un radio de 25km, el número de clúster o zonas dentro de la región con alta concentración del residuo y el período de máxima disponibilidad.

La cantidad de residuos generados y recuperados para su aprovechamiento energético se estimó en base húmeda considerando el factor producto-residuo (F_R), el factor de disponibilidad (F_D), humedad del residuo (M) y producción del cultivo principal que se muestran en la tabla 3.2. En consecuencia, se estima que la cantidad anual total de residuos de cultivos agrícolas recuperables (húmedos) en Santander es de aproximadamente 2.5 millones de toneladas, de las cuales 56.58 % son residuos agrícolas de cosecha (RAC) y 43.42 % residuos agro-industriales (RAI). Considerando el contenido de humedad de cada residuo y su poder calorífico La cantidad total de energía que se puede recuperar está estimada en 16.69 PJ, que incluye 7.72 PJ de RAC y 8.97 PJ de RAI como se muestran en las Tablas 3.2 y 3.3.

La participación de cada tipo de cultivo se presenta en la Fig. 3.1. La caña de panela presenta el mayor potencial energético entre todos los tipos de cultivos evaluados; esto se debe a los altos niveles de productividad alcanzados por este tipo de cultivo en el sur del departamento, y también a la elevada tasa de disponibilidad de sus residuos, los cuales no presentan usos alternativos significativos. Los residuos de la caña de panela junto a los residuos de piña (19.36 %), plátano (14.11 %), cacao (12.68 %) y la palma de aceite (7.38 %) aportan más del 80.0 % de la energía total estimada por año.

Tabla 3.2: Potencial energético de los principales residuos agrícola de Santander

Cultivo	Producción 2002–2020 (kt·año ⁻¹)	F_D (-)	Residuo Identificado	F_R (-)	Humedad (%)	LHV (MJ·kg ⁻¹)	Residuo (kt·año ⁻¹)	PE (TJ·año ⁻¹)
Aguacate	19.29	0.60	Cascara	0.05	82.42	14.65	0.58	1.49
			Descarte	0.10	74.17	14.69	1.16	4.39
			Poda	0.15	56.15	17.36	1.74	13.21
			Rama	0.10	14.95	18.22	1.16	17.94
			Semilla	0.32	46.74	13.25	3.70	26.14
Arracacha	3.36	0.54	Descarte	0.24	76.11	7.20	0.44	0.75
			Rastrojo	2.65	83.59	12.17	4.81	9.60
Arroz	6.65	0.50	Cascarilla	0.20	7.55	15.67	0.67	9.63
			Tamo	2.35	73.59	13.54	7.81	27.94
Banano	11.52	0.50	Descarte	0.15	83.75	10.82	0.86	1.52
			Raquis	1.00	94.54	7.86	5.76	2.47
			Vastago	5.00	93.62	8.84	28.79	16.23
Cacao	20.95	0.56	Cacota	15.25	87.41	13.96	178.89	314.40
			Descarte	5.90	85.47	14.11	69.21	141.92
			Hojas	2.66	17.98	13.86	31.20	354.61
			Tallos	2.83	71.68	13.72	33.20	129.02
Café	29.92	0.50	Cisco	0.21	10.42	19.26	3.14	54.22
			Pulpa	2.13	80.62	18.52	31.87	114.36
			Tallos	3.02	29.01	19.06	45.18	611.42
Caña Panela	237.67	0.45	Bagazo	2.53	43.39	19.37	270.59	2967.72
			Cogollo	3.25	68.50	16.02	347.59	1753.84
			Hojas Secas	0.50	8.58	17.42	53.48	851.71
Cebolla Junca	31.85	0.50	Descarte	0.25	71.45	14.69	3.98	16.71
			Rastrojo	0.37	82.53	13.92	5.89	14.33
Fique	2.52	0.80	Bagazo	5.00	85.36	13.80	10.10	20.40

Tabla 3.2: Potencial energético de los principales residuos agrícola de Santander (Continuación)

Cultivo	Producción 2002–2020 (kt·año ⁻¹)	F_D (-)	Residuo Identificado	F_R (-)	Humedad (%)	LHV (MJ·kg ⁻¹)	Residuo (kt·año ⁻¹)	PE (TJ·año ⁻¹)
Frijol	8.99	0.62	Cascara	0.12	51.83	12.56	0.67	4.05
			Descarte	0.05	51.25	13.45	0.28	1.83
			Rastrojo	4.96	83.72	12.93	27.65	58.20
Guayaba	35.97	0.58	Descarte	0.15	81.32	7.31	3.13	4.27
			Poda	0.35	47.26	17.06	7.30	65.71
Limón	18.70	0.70	Cascara	0.40	69.43	12.88	5.24	20.61
			Poda	0.35	43.69	15.18	4.58	39.16
Maíz	29.44	0.63	Capacho	0.21	8.52	16.59	3.89	59.10
			Hoja Seca	2.00	11.30	18.58	37.09	611.37
			Rastrojo	0.93	34.06	14.91	17.25	169.58
			Tusa	0.27	29.41	14.74	5.01	52.09
Mandarina	72.68	0.70	Cascara	0.30	70.19	15.46	15.26	70.36
			Poda	0.32	47.35	16.04	16.28	137.47
Mora	18.69	0.45	CCyS	0.25	82.40	18.80	2.10	6.96
			Hojas y Tallos	2.00	29.05	16.87	16.82	201.34
			Descarte	0.30	83.91	15.63	2.52	6.35
Naranja	33.04	0.70	Casc Externa	0.15	69.30	13.81	3.47	14.71
			Casc Interna	0.35	69.99	13.69	8.10	33.27
			Poda	0.30	34.49	14.44	6.94	65.65
Palma Aceite	173.27	0.55	Cuesco	0.22	19.86	17.34	20.97	291.34
			Fibra	0.63	33.24	18.58	60.03	744.87
			Raquis	1.06	59.13	17.48	101.01	721.85
Papa	110.13	0.50	Cascara	0.15	82.09	14.11	8.26	20.88

Tabla 3.2: Potencial energético de los principales residuos agrícola de Santander (Continuación)

Cultivo	Producción 2002–2020 (kt·año ⁻¹)	F_D (-)	Residuo Identificado	F_R (-)	Humedad (%)	LHV (MJ·kg ⁻¹)	Residuo (kt·año ⁻¹)	PE (TJ·año ⁻¹)
Papaya	5.00	0.65	Descarte	0.30	74.74	14.07	16.52	58.73
			Rastrojo	0.94	72.58	13.46	51.76	191.09
			Casc y Sem	0.30	84.08	14.53	0.97	2.25
			Descarte	0.10	84.54	13.77	0.33	0.69
			Hojas y Tallos	0.05	78.86	13.63	0.17	0.47
Piña	222.80	0.63	Cascara	0.15	74.96	12.70	21.05	66.98
			Corazon	0.10	85.57	13.59	14.04	27.52
			Descarte	0.05	83.49	10.21	7.02	11.83
			Rastrojo	3.10	86.40	19.76	435.12	1169.04
Platano	113.08	0.50	Descarte	0.15	84.05	14.64	8.48	19.81
			Raquis	1.00	10.66	13.34	56.54	673.75
			Vastago	5.00	9.89	13.06	282.69	3327.60
Tomate	45.62	0.50	Descarte	0.35	91.97	15.41	7.98	9.88
			Rastrojo	0.45	79.75	14.16	10.27	29.43
Yuca	101.70	0.54	Cascara	0.02	69.45	13.90	1.10	4.67
			Descarte	0.10	63.98	14.32	5.49	28.33
			Hojas	0.16	39.79	16.58	8.79	87.71
			Tallos	0.38	68.03	15.69	20.87	104.67

Tabla 3.3: Disponibilidad de los principales cultivos agrícolas en Santander y su potencial energético

Cultivo	Prod. 2002-2020 (kt·año ⁻¹)	Residuo 2002-2020 (kt·año ⁻¹)	% del total	Potencial Energético (TJ·año ⁻¹)	Disp. Máxima (kt·año ⁻¹)	Índice Disp. (%)	No. Clúster	Periodo de máxima disponibilidad
Aguacate	19.29	8.33	0.34	63.16	3.52	42.18	2	Mar-May; Sep-Nov
Arracacha	3.36	5.25	0.21	10.35	1.92	36.66	2	Mar-May; Sep-Nov
Arroz	6.65	8.48	0.34	37.57	4.44	52.31	1	Nov-Ene; Jun-Ago
Banano	11.52	35.41	1.44	20.22	14.95	42.21	2	Abr-Jun; Oct-Dic
Cacao	20.95	312.49	12.68	939.94	132.42	42.37	1	Oct-Dic
Café	29.92	80.19	3.25	780.00	30.37	37.87	1	NE
Caña de Panela	237.67	671.65	27.25	5,573.27	205.83	30.65	1	Jun-Jul; Nov-Dic
Ceb. Junca	31.85	9.88	0.40	31.03	9.19	93.08	1	Jul-Nov
Fique	2.52	10.10	0.41	20.40	8.70	86.21	1	May-Jul; Nov-Ene
Frijol	8.99	28.59	1.16	64.07	14.69	51.37	1	Nov-Feb; Jun-Ago
Guayaba	35.97	10.43	0.42	69.98	6.62	63.51	1	Ene-Mar
Limón	18.70	9.82	0.40	59.77	7.90	80.52	1	Mar-May; Sep-Nov
Maíz	29.44	63.23	2.57	892.14	11.16	17.65	2	Nov-Ene; Jul-Sept
Mandarina	72.68	31.54	1.28	207.83	11.32	35.89	2	Ene-Mar; Jun-Ago
Mora	18.69	21.45	0.87	214.65	12.55	58.51	1	Mar-May; Oct-Dic
Naranja	33.04	18.51	0.75	113.63	6.62	35.80	2	Jun-Sep
Palma Aceite	173.27	182.02	7.38	1,758.06	85.08	46.74	1	Mar-May
Papa	110.13	76.54	3.11	270.69	61.48	80.32	1	Feb-May; Ago-Oct
Papaya	5.00	1.46	0.06	3.41	0.90	61.34	1	Oct-Dic; Mar-May

Tabla 3.3: Disponibilidad de los principales cultivos agrícolas en Santander y su potencial energético (Continuación)

Cultivo	Prod. 2002-2020 (kt·año ⁻¹)	Residuo 2002-2020 (kt·año ⁻¹)	% del total	Potencial Energético (TJ·año ⁻¹)	Disp. Máxima (kt·año ⁻¹)	Índice Disp. (%)	No. Clúster	Periodo de máxima disponibilidad
Piña	222.80	477.23	19.36	1,275.36	343.34	71.94	1	Abr-Jun; Sep-Nov
Plátano	113.08	347.71	14.11	4,021.15	101.73	29.26	2	Mar-Abr; Sep-Nov
Tomate	45.62	18.25	0.74	39.30	7.15	39.15	2	May-Jul; Nov-Ene
Yuca	101.70	36.25	1.47	225.37	8.66	23.89	2	Nov-Ene; Jun-Jul
Total	1,352.81	2,464.79	100.00	16,691.34	1,090.52	44.24	3	-

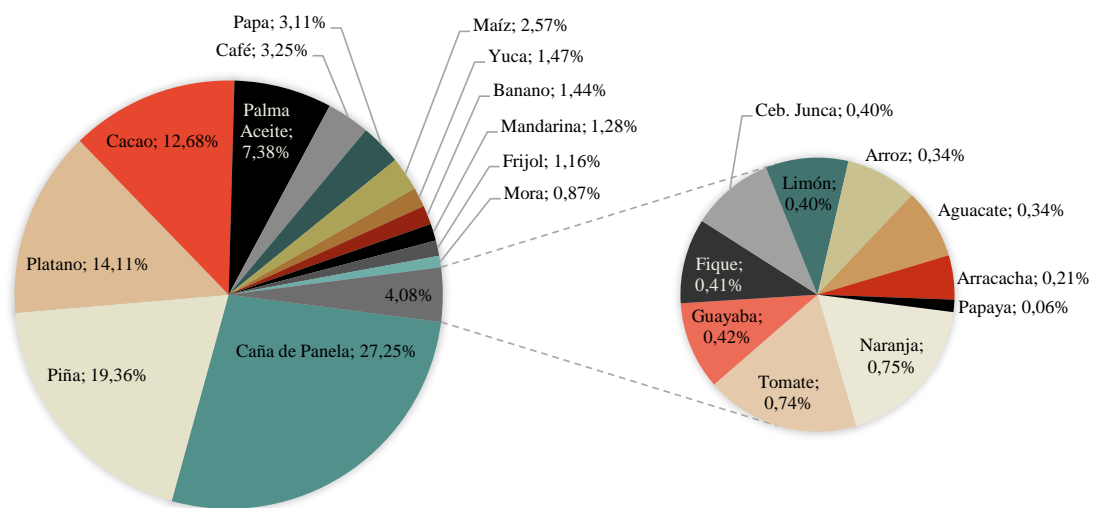


Figura 3.1: Aporte al potencial energético por cultivo

La Fig. 3.2 muestra el mapa del potencial de los residuos agrícolas en la región de Santander. Este mapa se ha construido mediante la agregación de las cantidades de residuos producidos en varias clases dentro de la base de datos GIS. En este caso, se utilizaron cinco categorías de colores para representar gráficamente el potencial de producción de residuos y su distribución geográfica en el mapa. Como se puede ver en la Fig. 3.2, el mayor potencial se encuentra en la parte sur de la región, principalmente porque el potencial de los residuos agrícolas del banano, plátano y de la caña de panela es mayor. El potencial energético de los residuos agrícolas seleccionados se presenta en la Fig. 3.3 y varían desde cero al oeste del departamento, municipios de Puerto Parra y Cimitarra, hasta más de 12.33 TJ/año al sur del departamento.

El índice de disponibilidad y número de clúster, nos dan una idea de que tan posible es concentrar un residuo alrededor de un punto central o varios. Así por ejemplo, para el cultivo de cebolla junca, es posible reunir el 93.08 % de los residuos generados alrededor de un punto central de recolección, lo que facilita la logística y disminuye los costos de transporte, caso contrario a los residuos de yuca, que presenta un índice de disponibilidad de solo el 23.89 % que nos indica que esta fracción se encuentra a menos de 20km de distancia de dos puntos de recolección, denotando una alta dispersión. Lo anterior pone en perspectiva, que no solo es suficiente una gran cantidad de residuo, sino que lo deseable es que se encuentre muy concentrada cerca a uno o varios puntos centrales.

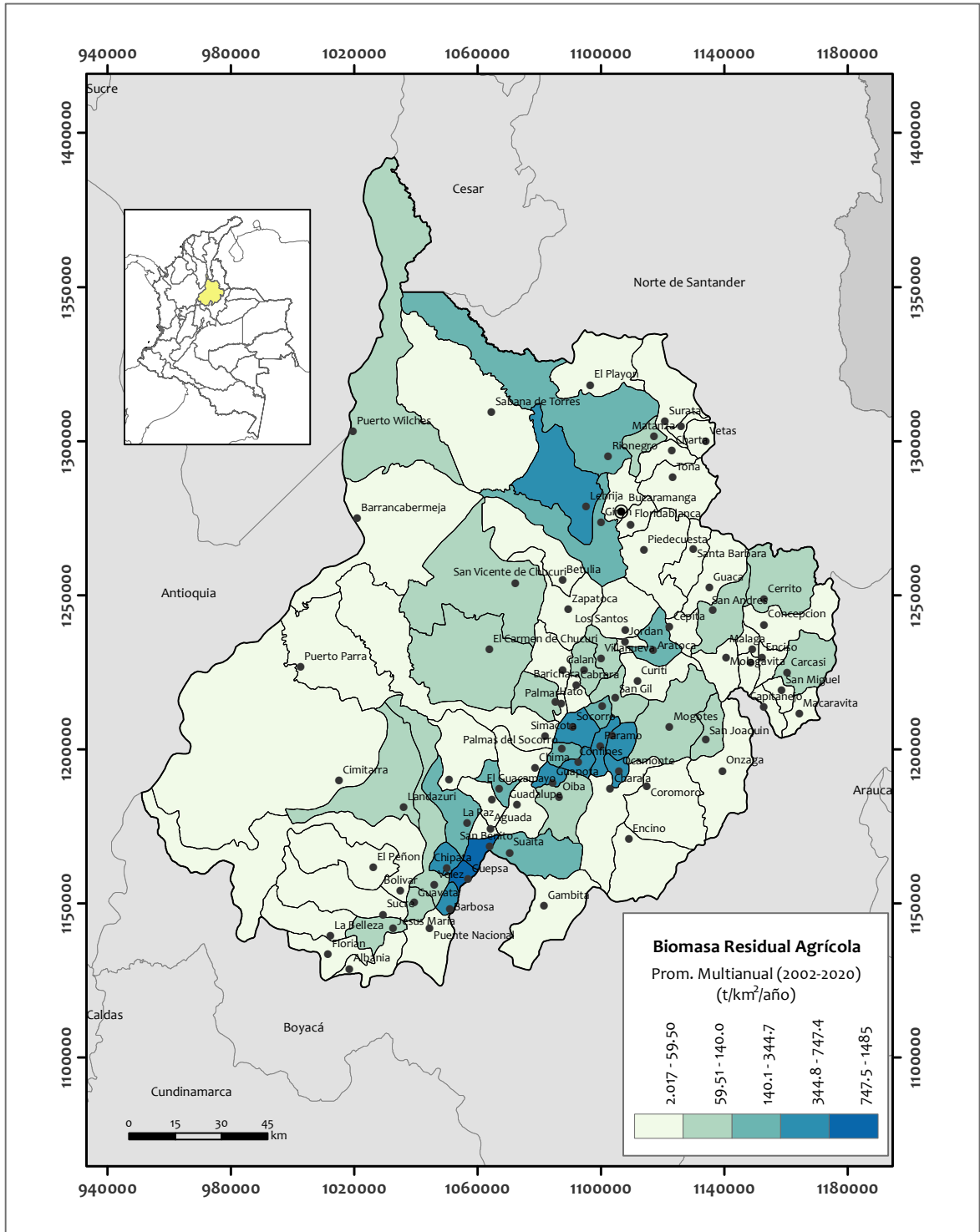


Figura 3.2: Mapa de la distribución geográfica de los residuos agrícolas en Santander

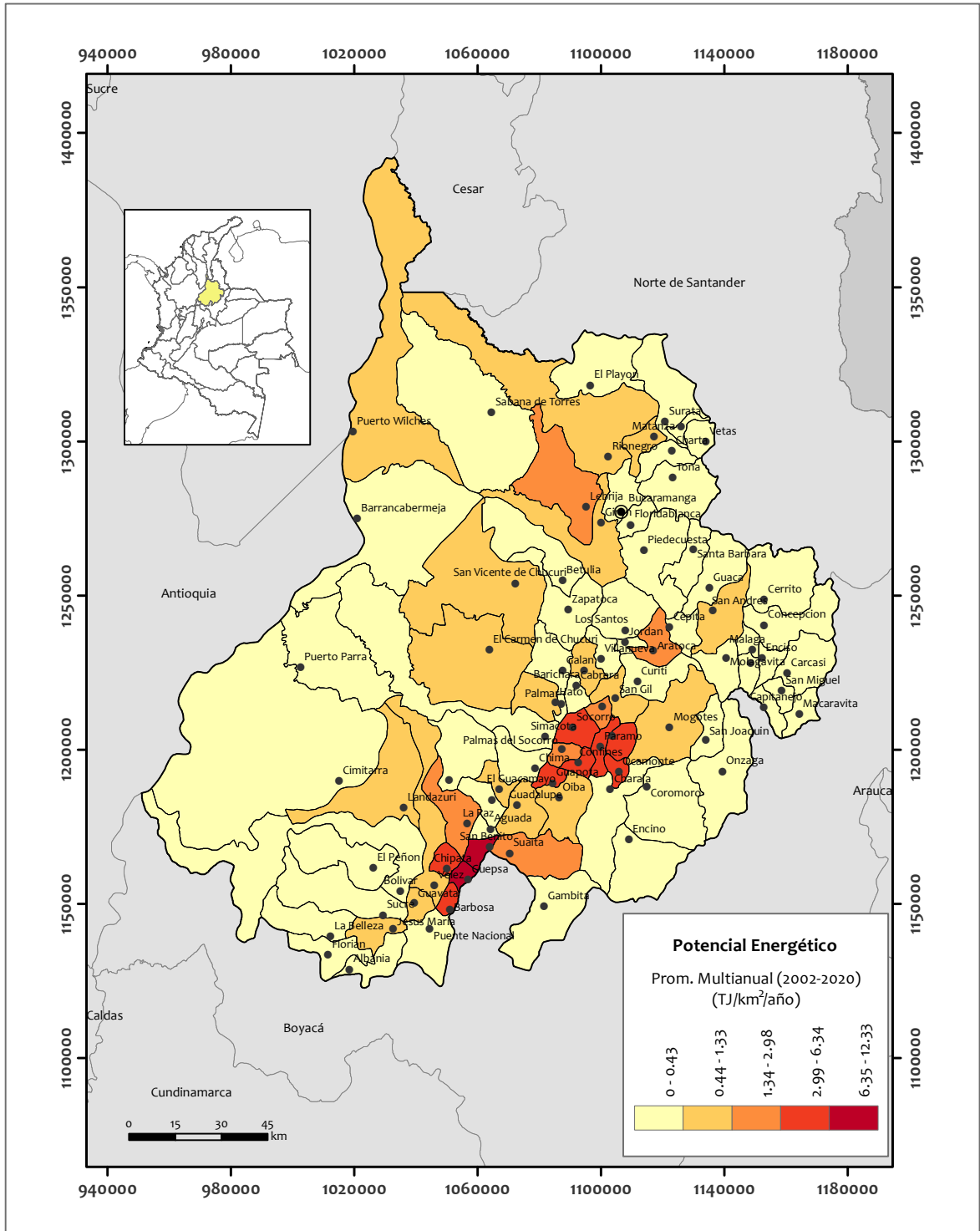


Figura 3.3: Mapa de la distribución geográfica del potencial energético en Santander

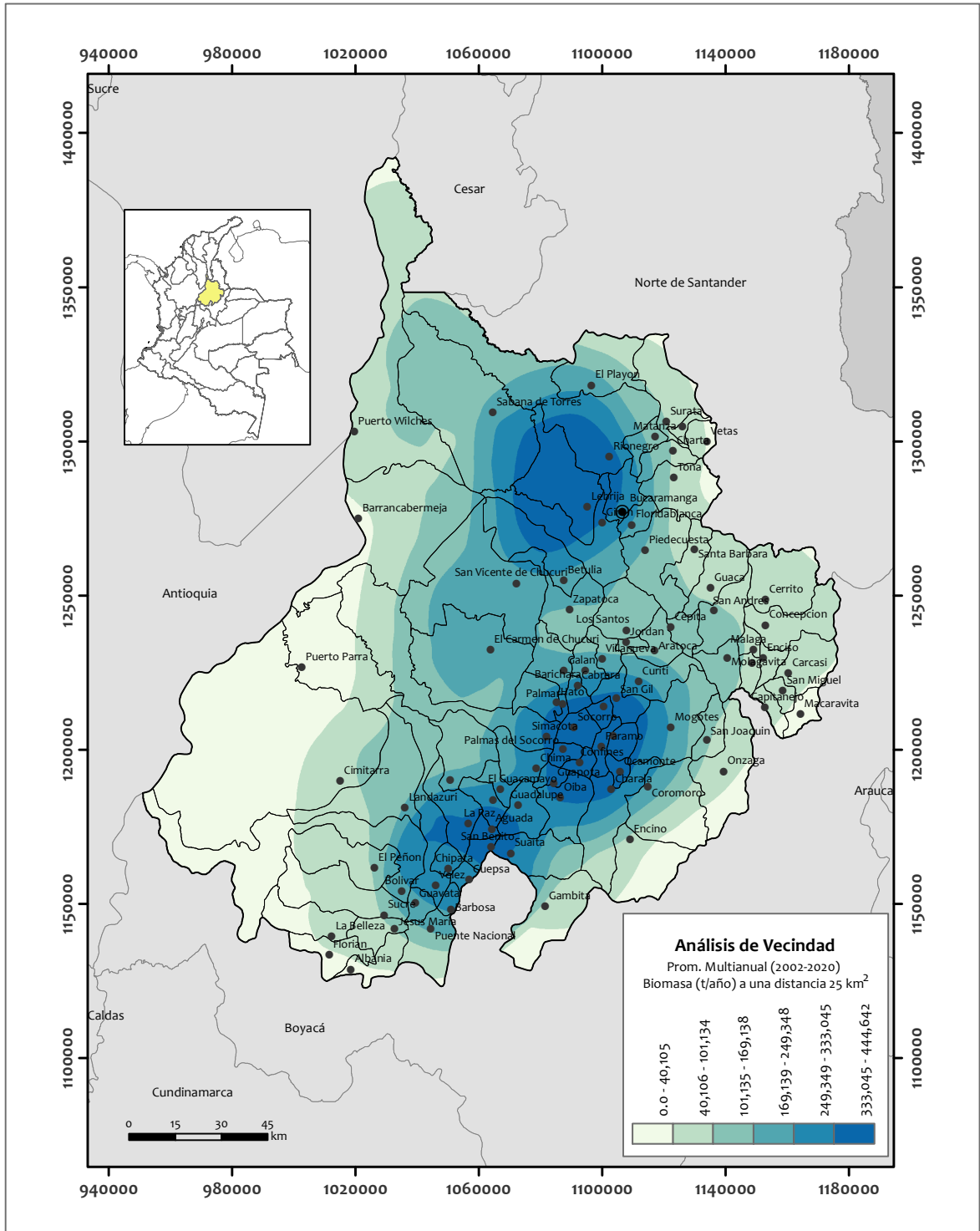


Figura 3.4: Mapa del análisis de vecindad en un área circular con un radio de 25km

Así mismo, Cada cultivo tiene su período de siembra, establecimiento y cosecha, por consiguiente los residuos derivados durante cada etapa exhiben diferentes períodos o picos de disponibilidad. Factor que determina, en particular, el período de mayor disposición de los residuos de su producción a un nivel de finca. Los períodos de máxima disponibilidad o picos de disponibilidad de la biomasa, han sido construidos a partir del calendario de cosecha de los cultivos agrícolas y los datos estadísticos de producción.

Muchos de estos cultivos presentan dos picos de producción en cada uno de los semestres del año, principalmente en los meses de marzo-abril-mayo y noviembre-diciembre, que corresponden a las épocas de recolección de los principales cultivos en la región. Se puede esperar que los precios de compra de los residuos agrícolas varíen ampliamente a lo largo del año, cayendo a su nivel más bajo en el período posterior a la cosecha. Gracias al hecho de que en muchas partes del país la producción agrícola puede realizarse tanto en invierno como en verano (cultivos de invierno y verano), esto ofrece una ventaja en términos de disponibilidad de existencias de biomasa en comparación con Europa, donde la producción de biomasa agrícola se reduce en invierno. En el apéndice C y en el apéndice D se presenta la cartografía correspondiente a los cultivos del departamento en relación a la distribución geográfica de los recursos, y su potencial energético.

3.3.3. Accesibilidad geográfica en la región de Santander

En la figura 3.5 se presenta el mapa de accesibilidad para Santander. Este mapa revela que las zonas más accesibles están fuertemente influenciadas por la infraestructura de transporte, localizadas en las principales cabeceras municipales hacia la periferia. También es evidente que la mayoría de las carreteras de tercer nivel no contribuyen a una mejor accesibilidad a los puntos de biomasa hipotéticos. Lo anterior demuestra que la red vial regional no es uniforme en términos de conectividad y accesibilidad ofrecidas hacia todos los nodos o cabeceras municipales, lo que permite considerar la presencia de fuertes desequilibrios en la misma prestación del servicio y la distribución espacial de la infraestructura.

La accesibilidad sugiere un problema importante en las zonas rurales. La infraestructura de transporte constituye un elemento esencial para entender la configuración espacial de un territorio. Su funcionalidad y cobertura representan no solo un indicador indirecto de la facilidad del intercambio económico y regional, sino que también condensa modelos territoriales precedidos por las mismas lógicas económicas. La vocación agropecuaria de una región sugiere escenarios de desarrollo territorial que deben

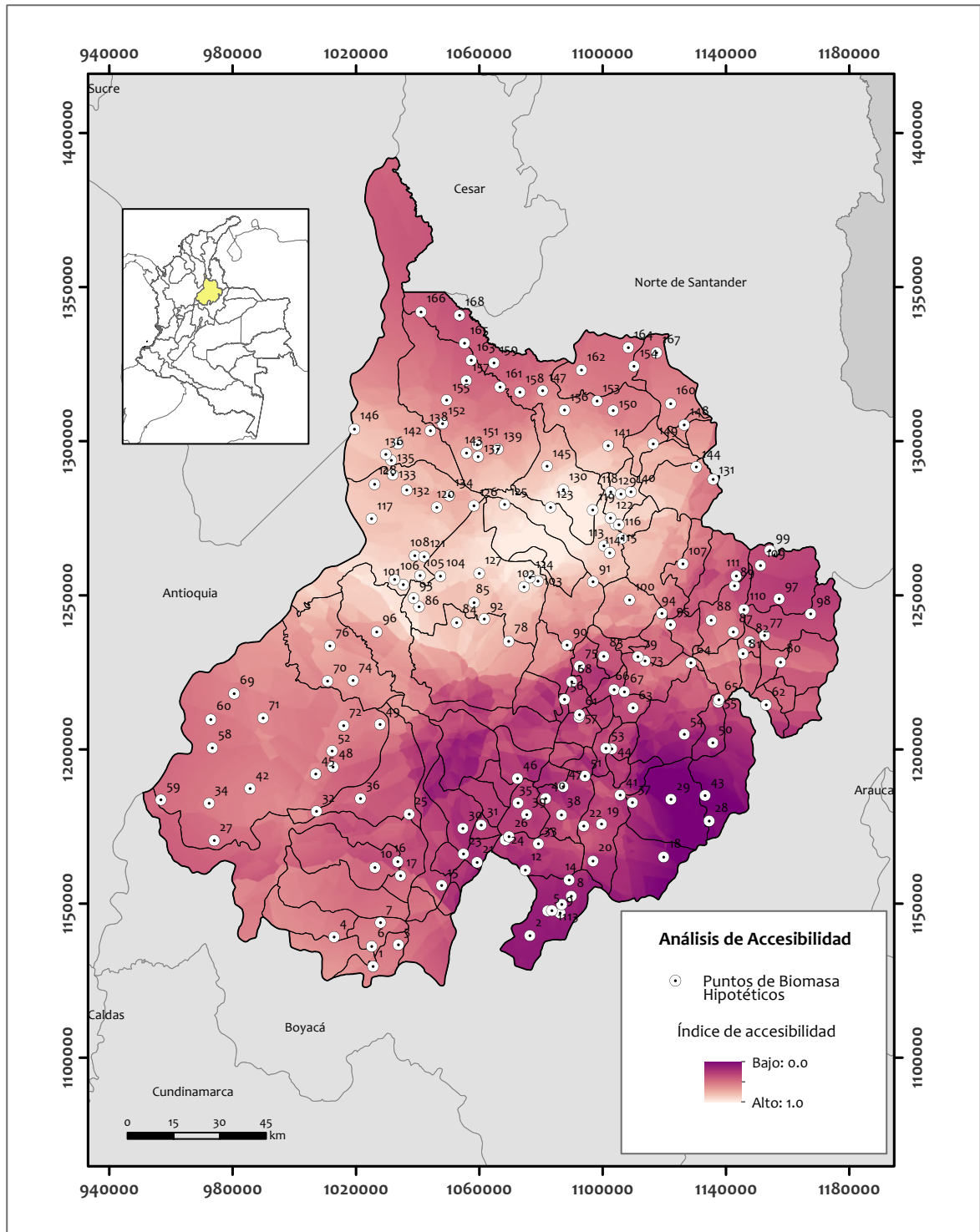


Figura 3.5: Mapa de accesibilidad geográfica de Santander

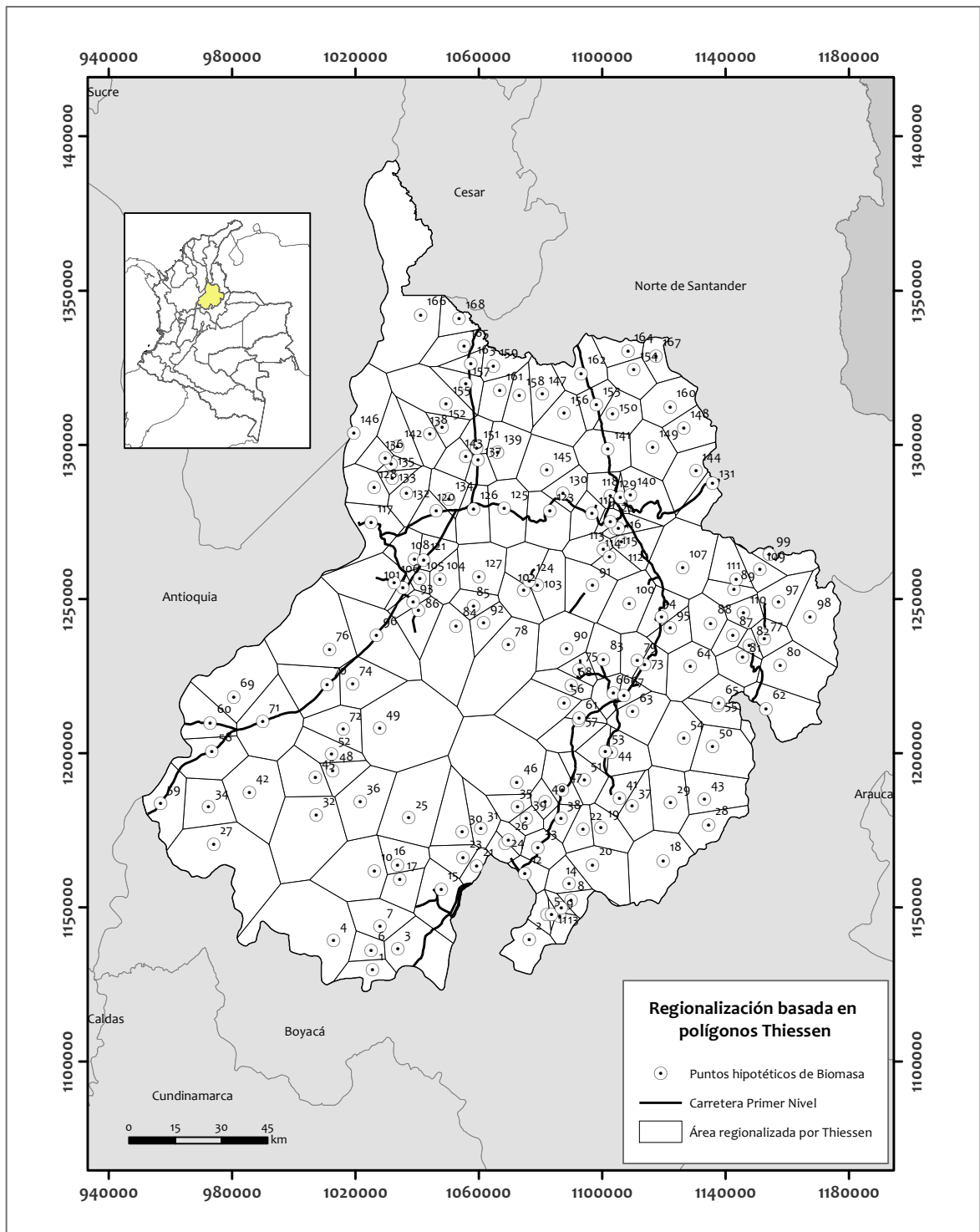


Figura 3.6: Mapa de la regionalización del área de estudio por polígonos Thiessen.

compatibilizarse con el desarrollo de una infraestructura de transporte vial adecuado y eficiente. En virtud, el aprovechamiento energético de residuos agrícolas requiere de mejor conectividad y accesibilidad para el territorio en general.

La división regional por polígonos Thiessen se muestra en la Figura 3.6, Las dinámicas territoriales sugieren distintas zonas con mayor densidad. El método del polígono de Thiessen, tal como se aplica aquí, puede interpretarse de la siguiente manera: (1) cuanto más densos están dispuestos los polígonos, más densa es la distribución de los sitios, definiendo así una menor área; (2) un área más pequeña de polígono no significa definitivamente un alcance menor de actividades en dicho sitio.

Por ejemplo, el sitio 93 en la Figura 3.6, corresponde a un área pequeña de polígono pero de intensa actividad agrícola. Por lo tanto, no existe una correlación definida entre el área del polígono y el alcance de las actividades de producción agrícola. Sin embargo, la ubicación del polígono generalmente refleja la importancia de tales sitios en la cultura regional y el papel en el intercambio con regiones externas. El mayor alcance de actividades debe ocurrir en el sitio central y tener el mayor impacto en los alrededores. En contraste los polígonos identificados con los números 25, 46, 49 y 78, que se encuentran entre los de mayor extensión, tienen prohibiciones técnicas fuertes que dificultarían la instalación de plantas de aprovechamiento energético.

3.3.4. Costos de Transporte

La Figura 3.7 presenta los costos de transporte para dos casos de interés regional muy específicos: el raquis de la palma de aceite y el bagazo de la caña de panela. En ambos casos se presenta el costo de transportar la totalidad de la oferta del residuo a cada uno de los PB, como es evidente en las regiones de mayor concentración del recurso los costos de transporte y logística asociados son mucho menores. Para el caso del raquis de la palma transportar la totalidad de los residuos a estas zonas tiene un costo entre 3.76–5.85\$US por tonelada, mientras que transportar esa misma cantidad de residuo a las regiones con mayor dispersión geográfica puede llegar a costar entre 18.87–25.11\$US por tonelada.

3.4. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede decir que la biomasa residual agrícola disponible en la región de Santander se puede utili-

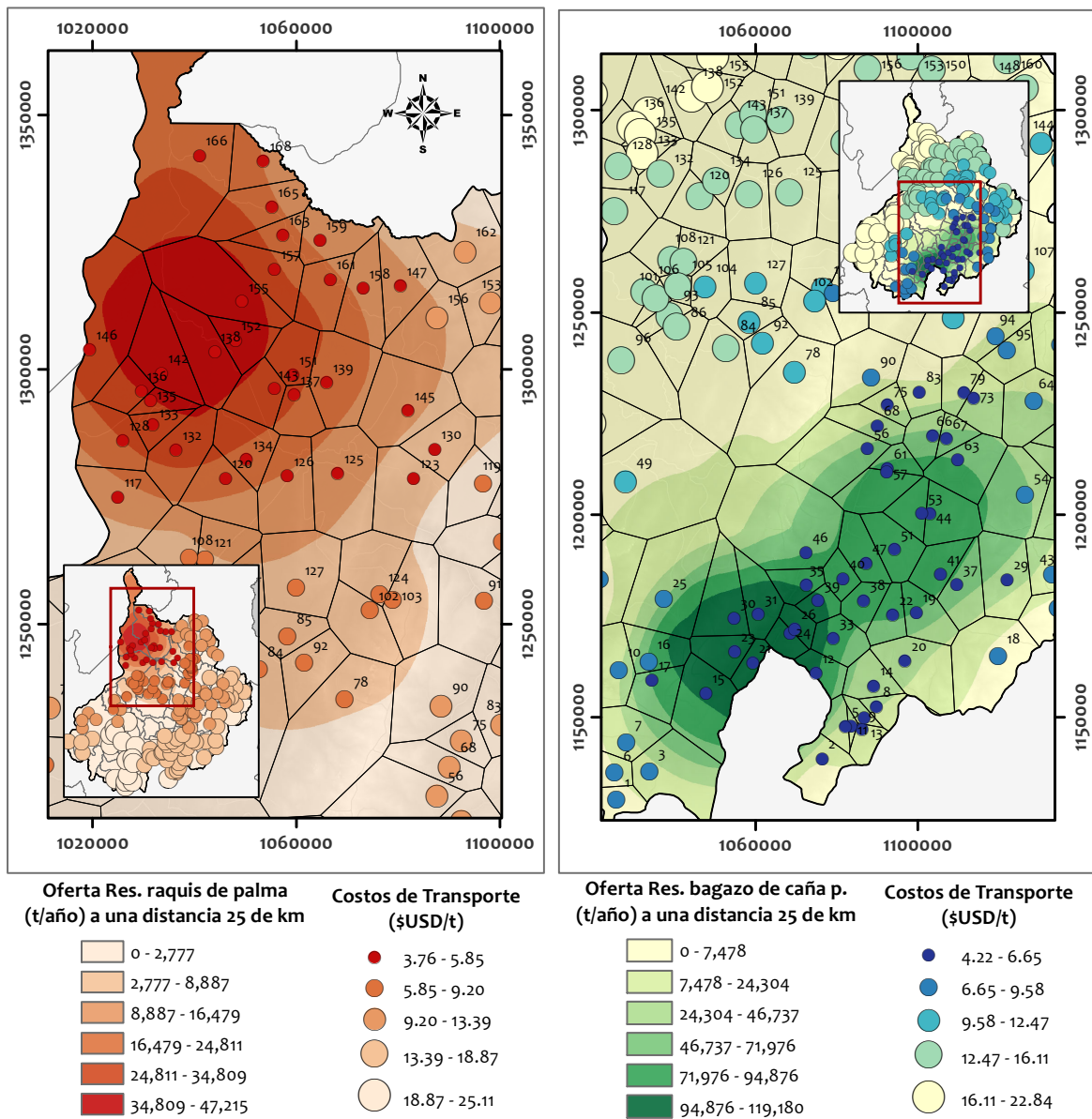


Figura 3.7: Mapas de los costos de transporte para: a. Raquis de palma y b. Bagazo de caña de panela; utilizando camión de doble ejes (C2)

zar como fuente de energía alternativa complementaria a las fuentes tradicionales de generación eléctrica, previo a estudios técnicos y económicos sobre las alternativas tecnológicas que podrían utilizarse para la transformación de biomasa residual en energía. Los monocultivos a base de caña de panela, cacao, palma de aceite, piña y plátano han sido predominante en la evaluación de la biomasa como recurso energético en la región.

Referencias

- Aalto, M., KC, R., Korpinen, O.-J., Karttunen, K., & Ranta, T. (2019). Modeling of biomass supply system by combining computational methods – a review article. *Applied Energy*, *243*, 145 – 154.
- Al-Hamamre, Z., Al-Mater, A., Sweis, F., & Rawajfeh, K. (2014). Assessment of the status and outlook of biomass energy in Jordan. *Energy Conversion and Management*, *77*, 183–192.
- Al-Hamamre, Z., Saidan, M., Hararah, M., Rawajfeh, K., Alkhasawneh, H. E., & Al-Shannag, M. (2017). Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 295–314.
- Asadullah, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *29*, 201–215.
- Bentsen, N. S., Felby, C., & Thorsen, B. J. (2014). Agricultural residue production and potentials for energy and materials services. *Progress in Energy and Combustion Science*, *40*, 59–73.
- Caschili, S., Montis, A. D., & Trogu, D. (2015). Accessibility and rurality indicators for regional development. *Computers, Environment and Urban Systems*, *49*, 98 – 114.
- Duku, M. H., Gu, S., & Hagan, E. B. (2011). A comprehensive review of biomass resources and biofuels potential in Ghana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 404–415.
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y Universidad Industrial de Santander (UIS).
- García Balboa, J. L. & Ariza López, F. J. (2009). Sinuosity pattern recognition of road features for segmentation purposes in cartographic generalization. *Pattern Recognition*, *42*(9), 2150–2159.

- Giuliano, A., Poletto, M., & Barletta, D. (2016). Process optimization of a multi-product biorefinery: The effect of biomass seasonality. *Chemical Engineering Research and Design*, *107*, 236–252.
- González-García, S., Dias, A. C., Clermidy, S., Benoist, A., Maurel, V. B., Gasol, C. M., Gabarrell, X., & Arroja, L. (2014). Comparative environmental and energy profiles of potential bioenergy production chains in southern europe. *Journal of cleaner production*, *76*, 42–54.
- Hiloidhari, M. & Baruah, D. C. (2011). Crop residue biomass for decentralized electrical power generation in rural areas (part 1): Investigation of spatial availability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 1885–1892.
- Hiloidhari, M., Das, D., & Baruah, D. C. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *32*, 504–512.
- Iye, E. L. & Bilsborrow, P. E. (2013). Assessment of the availability of agricultural residues on a zonal basis for medium- to large-scale bioenergy production in nigeria. *Biomass and Bioenergy*, *48*, 66–74.
- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography*, *7*(1), 186–190.
- Kukrety, S., Wilson, D. C., D'Amato, A. W., & Becker, D. R. (2015). Assessing sustainable forest biomass potential and bioenergy implications for the northern lake states region, usa. *Biomass and Bioenergy*, *81*, 167–176.
- Mu, L. (2009). Thiessen polygon. In R. Kitchin & N. Thrift (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 231–236). Oxford: Elsevier.
- Paiano, A. & Lagioia, G. (2016). Energy potential from residual biomass towards meeting the eu renewable energy and climate targets. the italian case. *Energy Policy*, *91*, 161–173.
- Richter, A., Ng, K. T., Karimi, N., Wu, P., & Kashani, A. H. (2019). Optimization of waste management regions using recursive thiessen polygons. *Journal of Cleaner Production*, *234*, 85–96.

- Scarlat, N., Martinov, M., & Dallemand, J.-F. (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the european union: potential and limitations for bioenergy use. *Waste management*, *30*(10), 1889–1897.
- Singh, J., Panesar, B., & Sharma, S. (2008). Energy potential through agricultural biomass using geographical information system—a case study of punjab. *Biomass and Bioenergy*, *32*(4), 301 – 307.
- Singh, J., Panesar, B., & Sharma, S. (2010). A mathematical model for transporting the biomass to biomass based power plant. *Biomass and Bioenergy*, *34*(4), 483–488.
- Sultana, A. & Kumar, A. (2012). Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. *Applied Energy*, *94*, 192 – 201.
- Summers, M., Jenkins, B., Hyde, P., Williams, J., Mutters, R., Scardacci, S., & Hair, M. (2003). Biomass production and allocation in rice with implications for straw harvesting and utilization. *Biomass and Bioenergy*, *24*, 163–173.
- UPME (2015). *Plan energético nacional Colombia, Ideario Energético 2050*. Bogota: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D., & Koukios, E. (2001). Assessment of biomass potential for power production: a gis based method. *Biomass and Bioenergy*, *20*(2), 101 – 112.
- Zhang, F., Wang, J., Liu, S., Zhang, S., & Sutherland, J. W. (2017). Integrating gis with optimization method for a biofuel feedstock supply chain. *Biomass and Bioenergy*, *98*, 194 – 205.

4

Bioenergía en Santander: Ubicación de plantas de biomasa

En este capítulo, el objetivo es desarrollar una metodología científica y estratégica de toma de decisiones para determinar y clasificar sitios adecuados para la ubicación de plantas de biomasa. Estas ubicaciones pueden considerarse las más adecuadas en relación a su entorno, y permiten no solo captar y buscar un equilibrio entre criterios técnicos, socio-económicos y ambientales, sino también la realización de investigaciones más detalladas en orden de caracterizar estos sitios para el diseño de posibles escenarios de aprovechamiento energético de residuos agrícolas. Esta metodología está basada en análisis multicriterio AHP difuso e integrado a sistemas de información geográfica (SIG), lo que permite combinar factores espaciales y no espaciales, como distintos parámetros logísticos e indicadores de costos de transporte, restricciones técnicas y geográficas en el área de estudio y la oferta potencial del residuo, proporcionando así un análisis multidimensional a gran escala.

4.1. Introducción

En la planificación, logística y valorización de los residuos agrícolas, la enorme variabilidad en las condiciones de producción dificulta el desarrollo y generación de un marco conceptual, simple y operativo, que sirva de hoja de ruta para el diseño y adopción de sistemas más eficientes y sostenibles. En primer lugar, las condiciones físicas de la producción agrícola varían considerablemente de un lugar a otro. Por tanto, los productos obtenidos, los recursos que se utilizan en su fabricación y las velocidades

de transformación varían en consecuencia. En segundo lugar, la producción agrícola se realiza normalmente en un gran número de pequeñas unidades gestionadas de forma independiente. Los operadores difieren en capacidad, formación e inclinación hacia la agricultura. Esta variabilidad intrarregional influye no solo en las estrategias para el desarrollo agrícola, sino también en el papel potencial de la biomasa. Por último, y en relación con lo anterior, las áreas difieren con respecto a la dotación de recursos naturales y la densidad de población en relación a ellos, el nivel tecnológico, la organización y estructura económica y los patrones sociales, culturales y educativos.

De esta manera, la búsqueda de una metodología válida para ser aplicada con cierta generalidad a los problemas de planificación y gestión de los residuos agrícolas requiere de un estudio formal y metódico no solo de su potencial regional, sino de los factores o elementos exógenos que puedan sustentar o delimitar su uso (Honorato-Salazar & Sadhukhan; 2020). Las herramientas de análisis y evaluación deben soportar una amplia variedad de datos y criterios que permitan considerar desde las posibles consecuencias ambientales de la actividad, la idoneidad del uso de la tierra, los impactos sociales y económicos, hasta las políticas y procesos regulatorios (Azasi et al.; 2020). En el contexto de la utilización de los residuos agrícolas, la selección de un sitio adecuado para la instalación/operación de una planta de bioenergía, es un paso esencial hacia su adopción como una fuente de energía segura, sostenible y competitiva. Sin embargo, es una tarea compleja, debido principalmente a las compensaciones inherentes entre factores sociopolíticos, ambientales, ecológicos y económicos, que implican múltiples criterios espaciales y no espaciales conflictivos.

El estado actual del arte nos presenta diferentes técnicas a utilizar como enfoques metodológicos para delimitar el mejor sitio para localizar una planta de bioenergía. Estos enfoques se dividen en dos grupos principales: el primero utiliza Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el segundo, métodos de programación matemática. En el primer grupo se destaca el estudio realizado en la Comunidad de Valencia (España), en el cual se desarrolló una metodología enfocada en estrategias de logística y transporte para localizar una red de plantas de bioenergía basada en biomásas residuales agroindustriales y forestales (Perpina et al.; 2009). Asimismo, especialistas de la provincia de Alberta (Canadá) realizaron un estudio de factibilidad para la construcción de 13 plantas de pellets, incluyendo un estudio detallado de la red de transporte y las restricciones geográficas (Sultana & Kumar; 2012).

En el segundo grupo, se incluyen enfoques de programación matemática, tales co-

mo modelos de programación lineal entera mixta (MILP); ellos han sido utilizados con frecuencia como herramienta de apoyo a la decisión y método de optimización en la selección del sitio ideal de una planta de bioenergía, capacidad y costes asociados al transporte de biomasa (Kim et al.; 2011). Otros estudios han realizado la combinación de modelos de programación lineal construido desde una perspectiva espacial (Velazquez-Martí & Fernandez-Gonzalez; 2010). Tal combinación de herramientas permitió crear mapas de aptitud para la implementación de tecnologías renovables, como la solar, considerando criterios ambientales, económicos y sociales (Omitaomu et al.; 2012). Las metodologías descritas anteriormente pueden definirse como procesos que transforman y combinan datos geográficos y criterios de juicio (preferencias e incertidumbre) para obtener información útil y apropiada para la toma de decisiones.

Así, un tercer enfoque prometedor para la evaluación ambiental y los análisis de toma de decisiones se basa en la integración de Análisis de decisiones multicriterio (MCDA) y Sistemas de Información Geográfica (SIG). La integración de estas herramientas se puede lograr potencialmente a través de su capacidad de interconexión e interoperabilidad, lo que les permite intercambiar información relevante entre sí para abordar un problema particular. La efectividad de la decisión tomada depende entonces, claramente, de la calidad de los datos utilizados para producir los mapas de criterios considerados, así como del método utilizado para el análisis de toma de decisiones. En Estambul (Turquía), por ejemplo, se evaluó un conjunto de seis sitios potenciales para la instalación de una planta de energía eólica. Este estudio incluyó criterios como la aceptación social y el impacto al ecosistema (Kaya & Kahraman; 2010). Se han propuesto varios métodos de decisión multicriterios para combinarlos con SIG. El proceso analítico jerárquico (AHP) es una de las técnicas MCDM más comúnmente incorporada en los procedimientos de idoneidad basados en SIG (Mosadeghi et al.; 2015). Sin embargo, existe una serie de problemas asociados con los métodos MCDM. Uno de los principales, es que estas metodologías multicriterios asumen que los datos de entrada son precisos cuando en realidad, los datos tendrán algún grado asociado de inexactitud e incertidumbre.

Métodos avanzados de MCDM incluyen modelos de Inteligencia Artificial (IA) que proporcionan algoritmos más sofisticados para procesar información incierta o inexacta. Los modelos de IA incluyen técnicas de lógica difusa, redes neuronales, algoritmos evolutivos y modelos autómatas celulares. La lógica difusa es un método de IA particularmente apropiado para abordar la incertidumbre de los límites espaciales. Sin embargo,

aunque esta técnica es ampliamente utilizada, existen otros métodos que pueden producir resultados diferentes. La inconsistencia entre los métodos es un problema adicional con el MCDA. Al respecto, Kordi & Brandt (2012) realizaron un análisis comparativo del resultado de la adopción de AHP difusa con diferentes niveles de incertidumbre con AHP convencional. Sus resultados indican diferencias en los pesos resultantes y en los mapas de idoneidad, enfatizando que el AHP convencional es sensible a la incertidumbre dentro del modelo de decisión. Estos resultados indican que, debido al uso de funciones de pertenencia difusa, el concepto difuso también puede ser útil para problemas en los que se espera que la incertidumbre aumente en el tiempo, por ejemplo, en un caso en el que se supone que diferentes condiciones cambiarán en el futuro, pero es incierta la forma.

El objetivo de este capítulo es diseñar un sistema de soporte de decisiones espaciales (SDSS, por sus siglas en inglés) que pueda ayudar a las autoridades y a los responsables de la toma de decisiones a identificar sitios idóneos para la instalación de plantas de conversión de biomasa, utilizando criterios múltiples junto con sistemas de información geográfica.

4.2. Descripción del Caso de Estudio

Una evaluación preliminar de la producción de residuos agrícolas en Santander muestra un potencial de 15,400TJ/año (Escalante et al.; 2011). Entre las posibles fuentes de biomasa que no se han utilizado están los residuos de cultivos del cacao. A nivel nacional, Santander es el primer productor de cacao en grano, aprovechando así, las favorables condiciones naturales y la ubicación geográfica estratégica en la zona ecuatorial; por lo que, existen abundantes residuos disponibles durante todo el año. Actualmente, más de 40,000 ha se dedican a la producción de cacao, que se ha mantenido casi constante durante las últimas dos décadas; como se refleja en las estadísticas anuales de producción. De esta forma y dada la disponibilidad de datos, la exposición a diversos riesgos naturales (sísmicos, deslizamientos, erosión e inundación) y las complejas características geográficas, unida a la intensa actividad agrícola, el proceso de valorización energética de los residuos de cacao en Santander se toma como referencia para la validación de la metodología propuesta aquí. Se espera que el resultado de este estudio sirva para resaltar los posibles cuellos de botella o barreras que deben superarse para la adopción de tecnologías de biomasa.

4.3. Metodología

La toma de decisiones en proyectos de bioenergía requiere la adopción por parte de las autoridades de un conjunto complejo y coordinado de acciones a largo plazo que, permitan establecer prioridades de intervención y movilización de recursos, así como la reducción de riesgos de inversión. Lo anterior comprende la implementación de procedimientos que a partir de indicadores geográficos permita identificar, comparar y clasificar sitios adecuados para la instalación de sistemas basados en el uso sostenible de la biomasa residual. La presente investigación propone un modelo de decisión multicriterio difuso, construido bajo el paradigma de los sistemas de información geográfico (SIG) siguiendo las siguientes etapas:

- **Etapa 1:** Selección de criterios, subcriterios y restricciones. Desarrollo de la estructura jerárquica del proceso de decisión (i.e. construcción del marco de decisión estratégica).
- **Etapa 2:** Modelización de criterios de inclusión/exclusión para identificar áreas donde externalidades positivas permitan una integración eficiente de los objetivos económicos, sociales y ambientales, así como la definición de áreas remotas o aisladas con infraestructuras técnicas deficientes.
- **Etapa 3:** Análisis multicriterio AHP difuso para identificar sitios adecuados para la instalación de plantas de biomasa. Análisis de sensibilidad para constatar la influencia de los criterios adoptados en la clasificación de las alternativas.

El procesamiento de los datos, análisis estadístico y estandarización de los criterios y sub-criterios seleccionados se realizó en el software ArcGIS® 10.7. El método AHP difuso fue ejecutado por scripts desarrollados en lenguaje Python con el fin de diseñar procesos SIG personalizados. La información cartográfica del departamento de Santander fue proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a una escala de 1:100,000. Información topográfica se utilizó para crear modelos digitales de elevación (DEM) que se utilizaron a su vez para derivar los modelos de pendiente y aspecto. Los datos sobre el uso de la tierra y la cobertura de la tierra se obtuvieron a partir de imágenes de satélite Landsat ETM+ con una resolución espacial de 30m mediante técnicas de procesamiento de imágenes. La cartografía utiliza el sistema de coordenadas proyectadas Datum Magna Colombia-Bogotá.

4.3.1. Etapa 1: Selección de criterios y restricciones

La selección de los criterios de evaluación debe realizarse de manera tal que ofrezcan una comprensión global del problema. Un comité asesor científico compuesto por académicos, técnicos y expertos fue creado para determinar los principales cuellos de botella que afectan a la ubicación de plantas de energía renovable basadas en biomasa residual agrícola. Se seleccionaron tres criterios principales para clasificar los sitios adecuados, que son (i) disponibilidad de recursos, (ii) factores de transporte y logística y (iii) características de la pendiente. Este conjunto de criterios seleccionados debería representar adecuadamente el ámbito del problema y contribuir al objetivo principal.

4.3.1.1. Criterio 1: Disponibilidad de Recursos (C1)

Uno de los principales retos para la producción de energía a partir de biomasa es asegurar que el tipo correcto, la calidad correcta, la cantidad correcta y los canales adecuados de adquisición estén disponibles dentro de cierta distancia de la planta. Cada una de las anteriores características es esencial para el funcionamiento eficiente y económico de las planta de biomasa. En el capítulo (3) se define la metodología general para la estimación de la oferta de biomasa. Esta se calcula mediante la ecuación (4.1) (Escalante et al.; 2011):

$$B_k^{[j]} = F_D \times F_R \times P_k^{[j]} \quad (4.1)$$

donde $B_k^{[j]}$ representa la cantidad de residuo k disponible en el municipio j (t/año), F_D es el factor de disponibilidad, F_R es la relación producto-residuo, y $P_k^{[j]}$ representa la producción anual del producto principal en el municipio j (t/year).

Asimismo, el potencial energético para cada residuo disponible fue evaluado usando la ecuación (4.2). Este representa el contenido de energía de la biomasa que podría estar disponible técnicamente para propósitos energético.

$$E_k = (1 - M_k) \times LHV_k \times \sum B_k^{[j]} \quad (4.2)$$

donde E_k representa el potencial energético del residuo k , M_k el contenido de humedad, y LHV_k el poder calorífico inferior.

4.3.1.2. Criterio 2: Factores de Transporte y Logística (C2)

Sin caminos adecuados, claramente, es difícil transportar un residuo de cultivo agrícola del sitio de recolección a la planta de bioenergía. Las características físicas de una red de carreteras están asociadas con la geografía del área de estudio. Factores tales como sinuosidad, complejidad e impedancia se utilizaron para describir un segmento de carretera. El factor de sinuosidad es una medida de cuánto una carretera (u otra característica lineal) se desvía de ser recta. Un camino verdaderamente recto tiene una sinuosidad de “1”; A medida que aumenta el número de meandros, la sinuosidad se aproxima a “0”. El índice de sinuosidad se mide utilizando la ecuación (4.3):

$$I_s = \frac{d_R(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{d_E(\mathbf{p}, \mathbf{q})} \quad (4.3)$$

donde $d_R(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ es la longitud real entre los puntos \mathbf{p} y \mathbf{q} , $d_E(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ es la distancia euclidiana que se refiere a la distancia en línea recta entre este par de puntos. La distancia euclideana es la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre el punto de origen (\mathbf{p}) de coordenadas (X_p, Y_p) y el punto de destino (\mathbf{q}) de coordenadas (X_q, Y_q) , como se ilustra en la ecuación (4.4):

$$d_E(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2} \quad (4.4)$$

Desde el punto de vista de la caracterización topológica de la red vial, la complejidad se define como una medida de la movilidad, la conectividad, la accesibilidad al tránsito y el flujo vehicular. La complejidad se clasifica de acuerdo con la funcionalidad y capacidad de la sección de carreteras en tres niveles:

- Carretera de primer nivel: Carreteras estratégicas utilizadas para el transporte a nivel nacional. Se definen como caminos que proporcionan la ruta más satisfactoria entre lugares de importancia, cuya función práctica primaria es la integración de las principales áreas de producción y consumo de país.
- Carretera de segundo nivel: Autopistas nacionales que facilitan el acceso a los principales núcleos de población y producción y facilitan el desplazamiento dentro de los municipios y entre nodos clave que conectan con carreteras primarias.

- Carreteras de Tercer nivel: Senderos y caminos rurales que desempeñan una función local y se utilizan para interconectar los asentamientos más pequeños y los centros locales, las empresas agrícolas o las granjas con otros tipos de carreteras terrestres o zonas de cultivo y tierras forestales.

La evaluación de los costos de transporte para la distribución de biomasa residual se realizó utilizando el concepto de impedancia. En el análisis de redes en el contexto de los SIG, la impedancia es una medida de la resistencia, o costo, requerida para recorrer un camino dentro de la red, o viajar de un elemento de la red a otro. La impedancia puede medirse en unidades de tiempo, distancia, combustible utilizado o algún tipo de función de coste y está influenciada por el volumen de tráfico, la dirección, la topografía, los patrones de suministro o incluso el tiempo.

En este estudio, la impedancia se evaluó de acuerdo con la longitud, velocidad y complejidad de las secciones de carretera como variables que afectan la eficiencia y está dada por la ecuación (4.5):

$$\mathcal{I}_{p,q} = \frac{d_{p,q}}{v_{p,q}} \quad (4.5)$$

donde $\mathcal{I}_{p,q}$ es el valor de impedancia de ir desde el nodo p al nodo q , $d_{p,q}$ es la distancia real entre estos dos nodos y $v_{p,q}$ es la velocidad de diseño de acuerdo a la sección de carretera que comunica estos dos nodos. La Tabla 4.1 muestra los valores normativos de la velocidad en función de la pendiente y el tipo de carretera en Colombia. En esta tabla, la velocidad de diseño disminuye de acuerdo con los datos de elevación que varían de “plano” a “escarpado”, y el tipo de carretera (complejidad) por la cual el vehículo de transporte está transitando.

4.3.1.3. Criterio 3: Características de la Pendiente (C3)

Las características topográficas desempeñan un papel importante al momento de determinar la factibilidad técnica del proceso de recolección del residuo agrícola; debido a que este afecta directamente a la selección de equipos y herramientas, y por ende los costos asociados. Las pendientes más escarpadas requieren maquinaria más costosa y sofisticada. Así, mientras menor sea la pendiente, es más común el uso de maquinaria menos costosa y disponible en la producción agrícola. Los inversores potenciales deben

Tabla 4.1: Clasificación de velocidad de diseño en función de la complejidad de la ruta y la pendiente.

Tipo de Carretera	Tipo de Terreno	Velocidad de Diseño (km/h)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Carretera principal (dos calzadas)	Plano							4	3	3	3
	Ondulado						5	5	4	4	4
	Montañoso						6	6	5	5	5
	Escarpado						7	6	6	6	
Carretera principal (una calzada)	Plano					5	4	4	3		
	Ondulado				6	6	5	5	4		
	Montañoso				8	7	7	6			
	Escarpado				8	8	7				
Carretera secundaria	Plano			7	7	7	6				
	Ondulado		10	10	10	9	8				
	Montañoso		12	11	11	10					
	Escarpado	15	14	13	12						
Carretera terciaria	Plano		7	7	7						
	Ondulado	11	11	10	10						
	Montañoso	14	13	13							
	Escarpado	16	15	14							

ser conscientes de que las áreas con pendiente significativa representan un reto importante y que este factor afecta la accesibilidad a los residuos. En este aspecto, varias investigaciones sobre los sistemas de aprovechamiento de la biomasa agrícola y leñosa limitan el uso de estos recursos a una pendiente inferior al 30 % (Perpina et al.; 2009; Monzonís; 2011).

4.3.1.4. Sitios Candidatos para la Instalación de Plantas de Bioenergía

La selección del sitio para la planta de bioenergía debe considerar los costos asociados con la recolección y el transporte como factores neurálgicos en la etapa de planificación (Singh et al.; 2010). Por esta razón, un conjunto de puntos ficticios, denominados como puntos de biomasa (BP), se distribuyeron a lo largo de la red de carreteras (ver sección 3.2.2.1). Cada BP representa una alternativa en el modelo de decisión. La oferta de biomasa residual calculada por el análisis de vecindad se asoció a cada uno de estos BP. Se consideró una distancia máxima de 25 km entre las áreas de cultivo y el sitio

de selección de la planta de bioenergía como heurística, de acuerdo a las sugerencias establecidas por otros autores (Asadullah; 2014; Martínez; 2009).

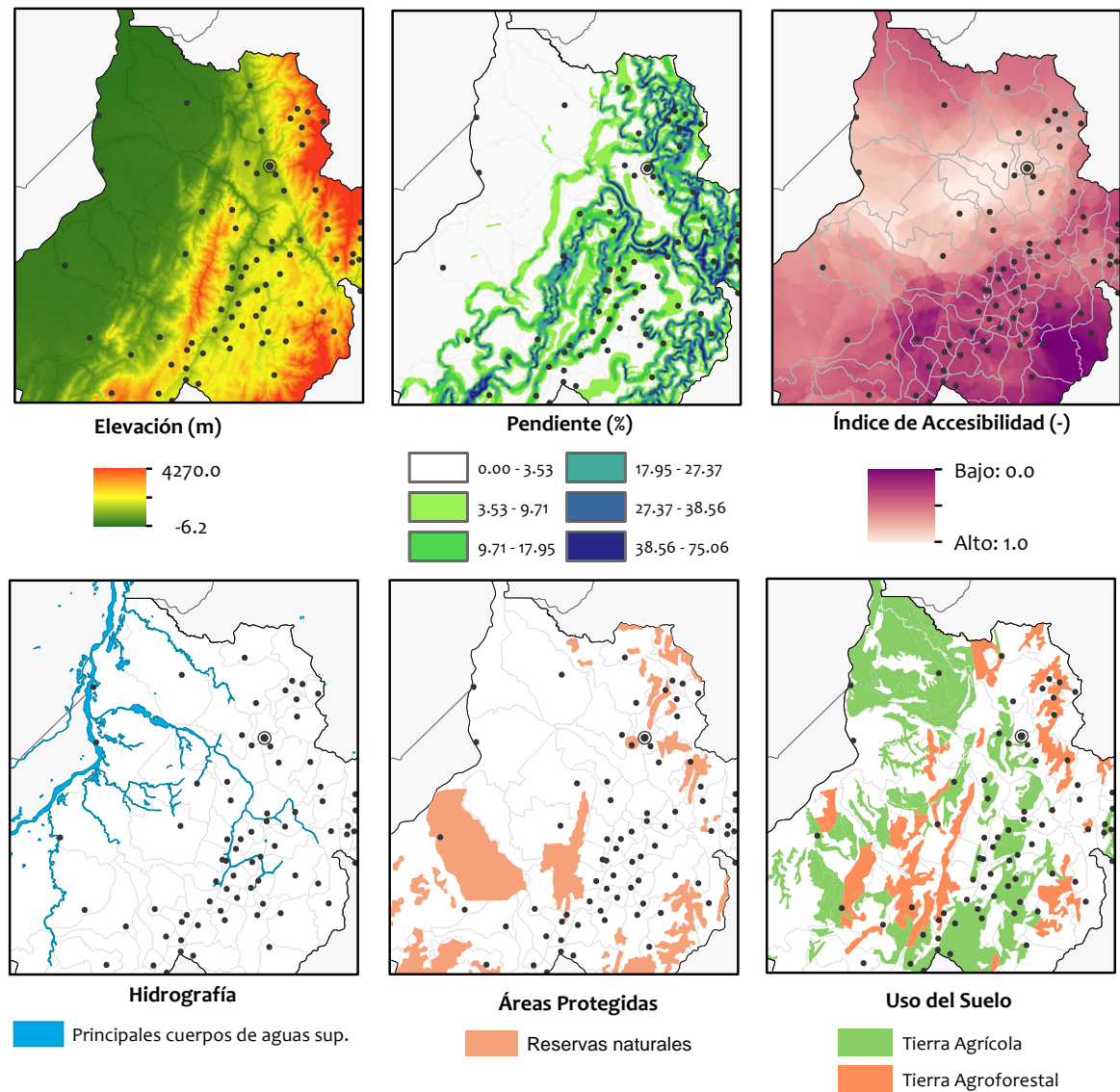


Figura 4.1: Principales factores geográficos utilizados en el análisis de idoneidad.

4.3.2. Etapa 2: Modelización de criterios de inclusión/exclusión

Un modelo de superposición creado a partir de un índice binario (lógica booleana) fue utilizado para identificar áreas geográficas restrictivas donde los sistemas de biomasa no son factibles. La definición de estas áreas debe ser coherente con los criterios

adoptados en orden de considerar las restricciones impuestas por los elementos físicos, antropogénicos y naturales que interactúan y definen un espacio geográfico, así como las políticas regionales y ambientales. Un conjunto de datos SIG binario fue creado para cada una de las restricciones (Tabla 4.2, Figura 4.1) en el modelo de exclusión mediante la reclasificación de sus atributos utilizando funciones booleanas. El modelo asigna el valor de “1” a sitios sin mayores restricciones y “0” en áreas no permitidas. El mapa de exclusión final fue creado mediante el producto de todas las capas resultantes, de acuerdo con la ecuación (4.6):

$$C_{Ei} = \prod_{j=1}^n C_{ij} \quad (4.6)$$

donde C_{Ei} es el valor Booleano (0, 1) de la celda i en el mapa de exclusión final y C_{ij} es el valor Booleano en la celda i para la capa temática j .

Tabla 4.2: Descripción del conjunto de datos geográficos utilizados para el análisis de exclusión.

Categoría	Atributo	Descripción
Áreas de administración especial	Parques naturales Reservas forestales Reservas de flora y fauna Áreas de conservación de suelos	Las áreas de administración especial cumplen una función importante en la conservación de hábitats de vida silvestre y áreas con valores sensibles o significativos. Por regulaciones regionales y nacionales para conservar los valores naturales, está prohibida cualquier actividad que tenga un efecto ambiental o ecológico significativo o acumulativo.
Riesgos naturales	Deslizamiento de tierra Riesgo de inundación Peligro sísmico Peligro volcánico	El entorno geológico y geomorfológico de Santander hace que este territorio sea vulnerable a deslizamientos de tierra, inundaciones y peligros sísmicos. Estos eventos naturales representan un riesgo para los proyectos de inversión en el contexto del sector agrícola, como los proyectos de biomasa. Por esta razón, las plantas de biomasa deben ubicarse lejos de áreas con probabilidad de desastres.

Tabla 4.2: Descripción del conjunto de datos geográficos utilizados para el análisis de exclusión. (continuación)

Categoría	Atributo	Descripción
Hidrogeología	Reservas de agua Cuerpos de agua Cuencas, canales y lagunas	El agua es un insumo esencial para la producción agrícola. Los agricultores necesitan agua para el riego para irrigar los suelos secos y ayudar a que los productos agrícolas crezcan. Por esta razón, las plantas de biomasa deben estar cerca de las fuentes de agua.
Aptitud del suelo	Elevación	Se asumió que las elevaciones más bajas eran más aptas debido a la pendiente relativamente plana, la producción agrícola actual y las temporadas de crecimiento más largas que las regiones montañosas. La planta de biomasa debe ubicarse preferiblemente en áreas planas para que sea de fácil acceso.
	Tipos de suelo	La gestión del suelo influye en la capacidad para mantener los cultivos. Para evitar las consecuencias ambientales de la agricultura de producción intensiva (erosión del suelo y pérdidas de nutrientes asociadas), la planta de biomasa debe estar cerca de la zona en suelos adecuados para la actividad agrícola y lejos de los suelos mal drenados y gravemente erosionados.
Uso del suelo	Tierras agrícolas	El proyecto de biomasa depende de la disponibilidad (usos existentes y futuros) de la tierra adecuada para usar. Esta tierra debe estar ubicada a una distancia razonable de otras formas de uso de la tierra. Las plantas de bioenergía generalmente se ubican en áreas agrícolas.
Accesibilidad	Infraestructura principal	El término “accesibilidad” se cita como objetivo prioritario y se considera un instrumento para alcanzar los objetivos de cohesión económica y social. La accesibilidad representa, en este contexto, un marco que ayuda a determinar áreas geográficas de fácil acceso, no solo en términos físicos (instalaciones de transporte) sino también a otras infraestructuras como instalaciones públicas de agua, electricidad y energía, gas y capitales municipales.

4.3.3. Etapa 3: Análisis Multicriterio AHP Difuso

El proceso analítico jerárquico (AHP) ha sido ampliamente utilizado como herramienta de apoyo en la toma de decisiones para la selección, evaluación y planificación de sistemas energéticos renovables y no renovables (Chang et al.; 2008). Esta metodología consta de tres etapas principales para resolver problemas: descomposición, comparación de juicios y síntesis de prioridades. En la etapa de descomposición, se diseña la estructura jerárquica que representa el problema de decisión, en la que los objetivos generales se presentan en el nivel superior y en los niveles inferiores se indican los criterios, subcriterios y alternativas, además de la forma en que interactúan. En la etapa de comparación de juicios, se establece una matriz de comparación en cada jerarquía mediante comparación por pares de criterios o subcriterios. En la etapa de síntesis de prioridades se calcula el peso compuesto para cada alternativa en base a la preferencia derivada de la matriz de comparación (Vahidnia et al.; 2009).

A pesar de su popularidad, la metodología AHP presenta una dificultad inherente y es su incapacidad para hacer frente a la ambigüedad y la subjetividad del juicio humano, así como las la incertidumbres asociadas a los criterios de decisión adoptados. A través de la lógica difusa es posible resolver la interpretación de los términos lingüísticos o medidas de incertidumbre del AHP y por lo tanto simular la ambigüedad del sistema cognitivo humano. El proceso analítico jerárquico difuso (AHP difuso) proporciona una metodología de estandarización de las escalas de calificación de los criterios de evaluación, que permiten el uso de términos cualitativos expresados por variables lingüísticas del mismo modo que un experto humano (Kahraman et al.; 2009). Así, cada término lingüístico o adjetivo se asocia a números difusos para representar incertidumbres en un juicio. Un número difuso triangular (TFN) es un tipo de número difuso cuya función de pertenencia está definida por tres números reales (l, m, u) , donde l representa el límite inferior, u el límite superior y m un valor intermedio como se muestra en la ecuación (4.7):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x - l) / (m - l) & l \leq x \leq m \\ (u - x) / (u - m) & m \leq x \leq u \\ 0 & \text{Otros Casos} \end{cases} \quad (4.7)$$

Para evaluar cada alternativa, la primera tarea es elegir la importancia relativa entre los criterios y construir una matriz de comparación por pares $\tilde{\mathbf{A}}$:

$$\tilde{\mathbf{A}} = (\tilde{a}_{i,j})_{n \times n} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1, 1, 1) & \cdots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (1, 1, 1) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Este estudio utiliza el análisis de extensión difusa propuesto por Chang (1996). Además, emplea una adaptación del algoritmo propuesto por Narula et al. (2003) para resolver problemas de selección donde se cuenta con muchas alternativas discretas y unos cuantos criterios cuantitativos. La comparación por pares emplea generalmente una escala semántica de nueve puntos para asignar prioridades (Tabla 4.3).

Las preferencias están basadas en los diferentes puntos de vista de cada experto implicado y/o en la revisión técnica. La consistencia de la matriz de comparación por pares debe evaluarse calculando la relación de consistencia (c_r), que se define como la relación entre el índice de consistencia (c_i) y un índice aleatorio (r_i), Ecuación (4.9):

$$c_r = \frac{c_i}{r_i} \quad (4.9)$$

El índice de consistencia para la matriz de comparación por pares difuso se determina por la relación expresada por ecuación (4.10) (Vahidnia et al.; 2009).

$$c_i = \frac{\tilde{\lambda}_{Max} - n}{n - 1} \quad (4.10)$$

donde n representa el número de criterios adoptados y $\tilde{\lambda}_{Max}$ El eigenvalor más grande de la matriz de comparación por pares $\tilde{\mathbf{A}}$. El índice aleatorio (r_i) representa el índice de consistencia de una matriz de comparación por pares generada aleatoriamente y depende del número de elementos que son comparados. El intervalo aceptable de c_r varía de acuerdo con el tamaño de la matriz; 0.05 para una matriz 3×3 , 0.08 para una matriz 4×4 y 0.10 para todas las matrices mayores, $n \geq 5$.

Tabla 4.3: Escala lingüística de comparación por par de criterios/alternativas y número triangular difuso asociado.

Escala lingüística que describe la importancia relativa entre dos criterios	Escala triangular difusa (l, m, u)	Valores difusos recíprocos ($1/u, 1/m, 1/l$)
Exactamente igual	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Iqual Importancia	(1, 1, 3)	(1/3, 1, 1)
Moderada Importancia	(1, 3, 5)	(1/5, 1/3, 1)
Fuerte Importancia	(3, 5, 7)	(1/7, 1/5, 1/3)
Muy Fuerte Importancia	(5, 7, 9)	(1/9, 1/7, 1/5)
Extrema Importancia	(7, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/7)
Intermediate Values	($x-1, x, x+1$); $x= 2, 4, 6, 8$	($1/(x+1), 1/x,$ $1/(x-1)$); $x=2, 4, 6, 8$

4.3.3.1. Determinación de Sitios Potenciales por Análisis Multicriterio

La identificación de sitios adecuados para la producción de energía a partir de biomasa en un contexto de sostenibilidad ambiental y económica es una etapa esencial en su éxito. Depende, no sólo de la distribución geográfica de los atributos, sino también de los juicios de valor involucrados en la toma de decisiones. La figura 4.2 muestra la estructura jerárquica del problema de decisión. La estructura jerárquica en el método AHP difuso consiste en organizar el problema de decisión en niveles (Anane et al.; 2012). El objetivo está en el primer nivel, los criterios y subcriterios están en el segundo y tercer nivel, respectivamente. Finalmente, el conjunto de alternativas factibles se representan en el cuarto nivel. La clasificación y evaluación de cada alternativa se realizó multiplicando la idoneidad calculada a partir de los factores por el producto de las restricciones, tal como se presenta en la ecuación (4.11):

$$\mathcal{Z}_k = \sum_{i=1}^M \mathcal{W}_i \mathcal{R}_i \left(\prod_{j=1}^n C_{ij} \right) \quad (4.11)$$

donde \mathcal{Z}_k representa un índice numérico (índice de idoneidad), entre 0 y 1 (“0” indica sitios no disponibles, “1” representa ubicaciones idóneas), \mathcal{W}_i is the peso del i -ésimo

criterio derivado de la matriz de comparación por pares difusos en el método AHP difuso extendido y \mathcal{R}_i es la puntuación estándar del i -ésimo criterio. Los pesos entonces se normalizan generalmente de modo que sumen la unidad.

La Tabla 4.4 muestra el número difuso triangular y la escala lingüística para cada criterio utilizado en este estudio. Las fases fundamentales del enfoque difuso son: fuzzificación por definición de funciones de pertenencia, evaluación de reglas difusas, inferencia difusa y defuzzificación (Jenks; 1967; Caniani et al.; 2016). El método de defuzzificación del centro de área se utilizó para transformar números triangulares difusos en números reales.

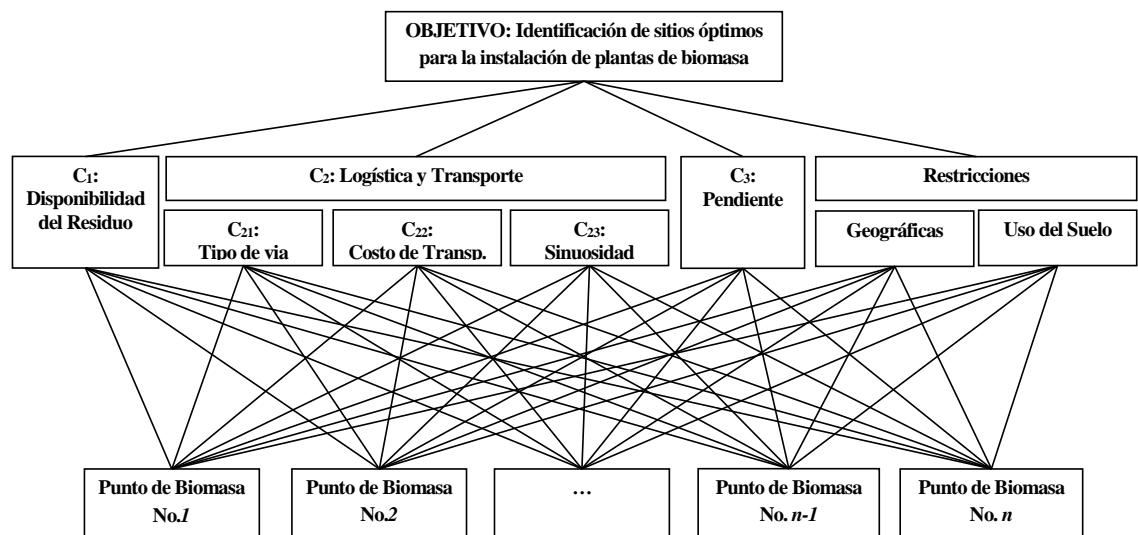


Figura 4.2: Estructura jerárquica del problema decisión.

4.3.3.2. Análisis de Sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para el modelo MCDA con el fin de verificar y analizar la validez de los resultados obtenidos (es decir, el ordenamiento de las alternativas de decisión) con respecto a los cambios en las prioridades de los criterios. Esto hace posible evaluar si los cambios en los pesos asignados a los criterios podrían afectar la decisión proporcionada por el modelo (Malczewski & Rinner; 2015). Si los cambios de peso de los criterios no dan lugar a cambios importantes en la decisión final, se podría concluir que los resultados del modelo son más robustos y fiables. Si, al cambiar los pesos, se pueden observar variaciones cualitativas y cuantitativas en los resultados, entonces el modelo dependerá en gran medida del juicio subjetivo de los pesos.

Tabla 4.4: Criterios y subcriterios en el modelo de decisión.

Criterio	Subcriterio	Característica	Escala difusa (<i>l, m, u</i>)
C₁: Disponibilidad del recurso		Muy concentrado	(0.700, 1.000, 1.000)
		Concentrado	(0.500, 0.700, 1.000)
		Moderadamente concentrado	(0.300, 0.500, 0.700)
		Moderadamente disperso	(0.000, 0.300, 0.500)
		Disperso	(0.000, 0.000, 0.300)
		Muy disperso	(0.000, 0.000, 0.000)
C₂: Transporte y logística	C₂₁: Tipo de vía	Carretera principal (2 calzadas)	(0.800, 1.000, 1.000)
		Carretera principal (Una calzada)	(0.400, 0.600, 0.800)
		Carretera secundaria	(0.100, 0.200, 0.400)
		Carretera terciaria	(0.000, 0.000, 0.100)
	C₂₂: Costos de transporte (Impedancia)	Muy alto	(0.500, 0.700, 1.000)
		Alto	(0.300, 0.500, 0.700)
		Moderado	(0.000, 0.300, 0.500)
		Bajo	(0.000, 0.000, 0.300)
		Muy bajo	(0.000, 0.000, 0.000)
	C₂₃: Sinuosidad	Muy alto	(0.500, 0.700, 1.000)
		Alto	(0.300, 0.500, 0.700)
		Moderado	(0.000, 0.300, 0.500)
		Bajo	(0.000, 0.000, 0.300)
		Muy bajo	(0.000, 0.000, 0.000)
	C₃: Características de la pendiente		Plana a ligeramente plana
Ligeramente plana y ondulada			(0.714, 0.857, 1.000)
Ondulada inclinada			(0.571, 0.714, 0.857)
Fuertemente ondulada e inclinada			(0.429, 0.571, 0.714)
Fuertemente quebrada			(0.143, 0.286, 0.429)
Escarpada			(0.000, 0.143, 0.286)
Muy escarpada			(0.000, 0.000, 0.143)

En este estudio, el análisis de sensibilidad se lleva a cabo utilizando un método de selección de factores (enfoque uno a uno), en el que se evalúa a su vez el impacto de cambiar los valores de cada criterio. Los cambios en los pesos de los criterios (W_i) se pueden calcular de acuerdo con la Ec. (4.12). Esta ecuación ilustra que si un tomador de decisiones quiere cambiar el peso de cualquier variable moviendo la barra asociada hacia arriba o hacia abajo, los pesos de otras variables también cambiarán y por lo

tanto el ranking de las alternativas cambiará (Chen et al.; 2010; Çetinkaya et al.; 2016).

$$\mathcal{W}_i = \mathcal{W}_{io} \pm \beta \mathcal{W}_{io} \quad (4.12)$$

donde \mathcal{W}_{io} es el peso del criterio a modificar en el caso base. El peso de los criterios \mathcal{W}_j se ajusta proporcionalmente de acuerdo a la ecuación (4.13):

$$\mathcal{W}_j = (1 - \mathcal{W}_i) \frac{\mathcal{W}_{jo}}{(1 - \mathcal{W}_{io})} \quad (4.13)$$

donde \mathcal{W}_j es el nuevo valor del peso asignado al criterio j y \mathcal{W}_i es el peso del criterio i a un cierto porcentaje de cambio (β) realizado. \mathcal{W}_{io} y \mathcal{W}_{jo} son los valores de los criterios i y j en el caso base. Se aplicó un rango de $\pm 25\%$ de desviación de peso a simulaciones en ambiente GIS. Adicionalmente, se implementaron tres estudios de caso para comprender los componentes del modelo responsables de los mayores cambios relativos en los resultados. En estos casos se adoptó un valor de -100% desviaciones de peso (β); como resultado:

- **Caso 1:** Se da un peso de cero al criterio de disponibilidad de recursos.
- **Caso 2:** Se da un peso de cero a los criterios de Transporte y Logística.
- **Caso 3:** Se da un peso de cero a los criterios de aptitud de pendiente

4.4. Resultados y Discusión

4.4.1. Disponibilidad del residuo

El cultivo de cacao en el departamento de Santander genera diferentes tipos de biomasa residual propios de su beneficio y comercialización, entre ellos (1) la cascara del cacao, también llamado cacota o mazorca, que representa la cápsula donde se encuentran las almendras de cacao, (2) los residuos vegetales, ramas muertas, hojas secas y restos procedentes de la poda realizada para el mantenimiento/manejo del árbol, y (3) los frutos descartados por no cumplir los atributos organolépticos o presentar brotes, plagas o enfermedades propias del cultivo (Figura 4.3).



Figura 4.3: Residuos del cultivo de cacao: a. Cacota del cacao (PH), b. Residuos de poda (TP), c. Frutos de descarte (RCF)

Tabla 4.5: Residuos de cacao generados y su correspondiente potencial energético

Cultivo	Producción 2002–2020 (t·año ⁻¹)	F_D (-)	Residuo	F_R (-)	Humedad (%)	Poder Calorífico (MJ·kg ⁻¹)	Biomasa Agrícola (kt·año ⁻¹)	Potencial Energético (TJ·año ⁻¹)
Cacao	20.95	0.56	Cacota	15.25	87.41	13.96	178.89	314.40
			Descarte	5.90	85.47	14.11	69.21	141.92
			Hojas	2.66	17.98	13.86	31.20	354.61
			Tallos	2.83	71.68	13.72	33.20	129.02

La Tabla 4.5 presenta los factores de residuo y disponibilidad, así como las características físicas de humedad y poder calorífico inferior (ver capítulo 3). La oferta de biomasa residual y el potencial energético de estos residuos fueron calculados por la Ec.(4.1) y la Ec.(4.2), respectivamente. La oferta de residuos de cacao como materia prima para la producción de energía se estima en 312.50kt/año encontrándose heterogéneamente distribuidos en todo el departamento. La cacota del cacao representa más del 57.25% de la biomasa total.

El mapa de la figura 4.4a muestra la distribución de la biomasa residual de cacao en el departamento de Santander calculada utilizando las estadísticas municipales en el periodo promedio de producción 2002–2020. Las áreas con mayor potencial se ubican hacia el centro del departamento. Los municipios de San Vicente de Chucurí, El Carmen de Chucurí y Landázuri tienen la mayor cantidad de biomasa residual con 24.98%, 19.62% y 15.95%, respectivamente; de un total estimado de aproximadamente 312.50 kt/año. Además, los cultivos en estos municipios cumplen con todos los requisitos agroecológicos (temperatura, propiedades del tipo de suelo, etc.), así como ligeras restricciones de pendiente y drenaje.

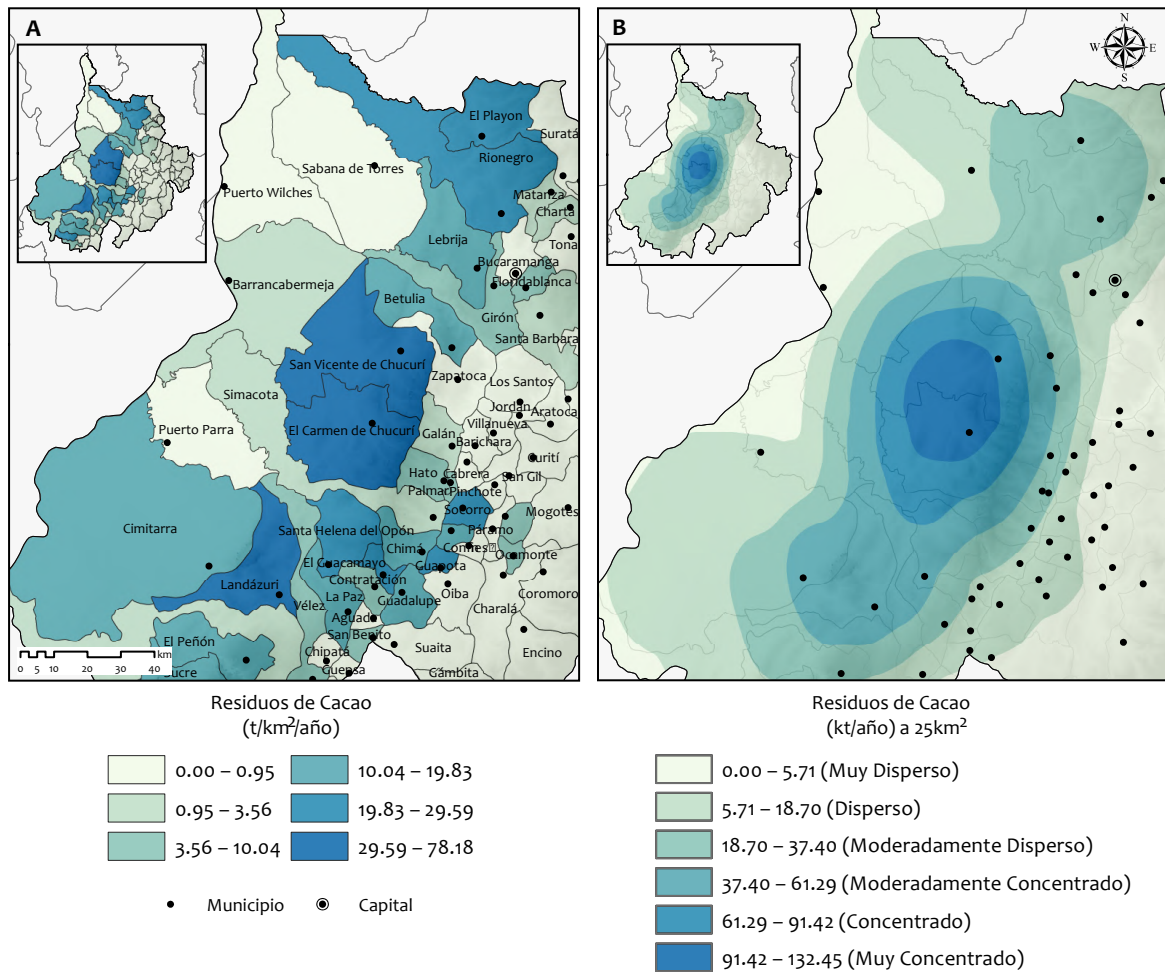


Figura 4.4: a. Mapa de la distribución geográfica de los residuos de cacao en Santander, b. Mapa del análisis de vecindad en un área circular con un radio de 25 km.

4.4.2. Sitios candidatos y análisis de exclusión

Para determinar los sitios potenciales para la planta de bioenergía, este estudio supone una distancia de referencia no superior a 25 km a lo largo de las carreteras entre las áreas de cultivo y el sitio de selección para la planta de bioenergía. De esta manera, un número de 168 puntos de biomasa (alternativas) fue calculado en todo el departamento. La distancia de separación entre cada BP puede variar de acuerdo con la extensión del área de estudio, considerando el equilibrio entre precisión y costo computacional debido a que la metodología AHP difuso incluye, además de la comparación entre criterios, la comparación entre alternativas. La Figura 4.5a muestra los puntos de biomasa calculados a través de toda red de carreteras del departamento. Además, este mapa muestra

las áreas excluidas como polígonos irregulares amarillos. De acuerdo con los resultados, las áreas de exclusión representan el 21.5 % del área total del departamento. Estas áreas cumplen con alguna de las restricciones ambientales presentadas en la tabla 4.2.

4.4.3. Evaluación de sitios candidatos

4.4.3.1. Disponibilidad del Residuo (C1)

El resultado del análisis de vecindad se muestra en la Figura 4.4b en la que es posible apreciar la cantidad de biomasa residual de cacao que está técnicamente disponible para ser utilizada en un punto específico. Este mapa describe el grado de dispersión geográfica de la biomasa residual de cacao en un área circular con un radio de 25 km. El área sombreada más oscura representa las ubicaciones geográficas donde el recurso se encuentra en la cantidad más alta, disminuyendo la intensidad del color disminuye la concentración hasta muy dispersa.

En áreas altamente productivas, es posible obtener un suministro de residuos de cacao hasta 132.45 kt/año. Esto implica que una planta de bioenergía a base de biomasa residual de cacao y ubicada en este lugar, requiere un área de recolección más pequeña para el suministro de materia prima. Por otra parte, la Tabla 4.6 muestra la clasificación de la biomasa residual de cacao acorde a su grado de dispersión; Se han creado seis categorías utilizando el método de quiebres naturales de Jenks. En perspectiva, las características específicas de la economía de escala restringen el diseño de las plantas de bioenergía a aquellas con una capacidad mínima de producción de al menos 51.20 kt/año de materia prima (López-Rodríguez et al.; 2009). De acuerdo con esta heurística, el porcentaje de superficie disponible se calculó en 15.92 %.

Tabla 4.6: Escala lingüística y clasificación del residuo del cacao en función de su dispersión.

Características	Suministro de Residuos de Cacao a 25 km (t/año)
Muy concentrado	111,542– 155,428
Concentrado	79,238 – 111,542
Moderadamente concentrado	51,809 – 79,238
Moderadamente disperso	28,038 – 51,809
Disperso	9,142 – 28,038
Muy disperso	0 – 9,142

4.4.3.2. Transporte y Logística(C2)

La red de carreteras en Santander comprende unos 4,225 km, de los cuales menos del 21 % corresponden a carreteras principales, mientras que las carreteras secundarias representan el 59 % del total. Además, el 31.5 % del total del conjunto de BP evaluado tiene valores medios de impedancia (véase la Ecuación (4.5)) inferiores a 16.65 min; Este valor representa el costo en tiempo (minutos) para mover la biomasa residual de un PB al otro más cercano. Además, para una planta de bioenergía situada en las zonas más accesibles, la distancia media entre pares vecinos es de unos 16.5 km y se encuentra más cerca de las áreas agrícolas del departamento. Asimismo, el análisis muestra que el índice de sinuosidad aumenta de acuerdo con la pendiente, sin embargo, hay secciones de carretera ubicadas en tierras con pendientes bajas con índice de sinuosidad entre 0.61 y 0.78.

4.4.3.3. Características de la Pendiente (C3)

La pendiente es un factor restrictivo; sin embargo, en el departamento de Santander, alrededor del 76.4 % de la superficie total presenta pendientes entre 0 y 15 %. Este factor es particularmente restrictivo en el lado este del departamento debido a la presencia de los Andes orientales. Aun así, hay amplios valles en el lado oeste con un intenso desarrollo agrícola.

4.4.4. AHP Difuso

Las Tablas 4.7 y 4.8 muestran los resultados de la matriz de comparación por pares para los criterios de primer y segundo nivel, respectivamente. Se observa que, de acuerdo con los valores adoptados para derivar la escala de prioridad, el criterio 1 (C1), correspondiente a la Disponibilidad de Biomasa, es el que más influencia tiene en la toma de decisiones, seguido por los factores de logística y transporte (C2) y las características de la pendiente (C3). Esto se debe a que una mayor disponibilidad del recurso conlleva a una disminución en el costo de los servicios utilizados para la instalación (Yagi & Nakata; 2011). Adicionalmente, la relación de consistencia (C_r) de estas matrices son inferiores a 0.05 (véase la ecuación (4.9)), lo que indica un buen nivel de consistencia en los juicios comparativos representados en estas matrices.

La figura 4.5b muestra el resultado de la metodología AHP difuso basada en SIG. A través de una escala 0–1 se indica el grado de viabilidad de cada PB en el proceso de

Tabla 4.7: Preferencias del AHP difuso en matrices de comparación por pares para el nivel de criterios.

	C_1 Disponibilidad de Recursos	C_2 Transporte y Logística	C_3 Características de la Pendiente	W_N
C_1	(1.000, 1.000, 1.000)	(1.000, 2.000, 3.000)	(1.000, 3.000, 5.000)	0.48
C_2	(0.333, 0.500, 1.000)	(1.000, 1.000, 1.000)	(1.000, 1.000, 3.000)	0.31
C_3	(0.200, 0.333, 1.000)	(0.333, 1.000, 1.000)	(1.000, 1.000, 1.000)	0.21

Tabla 4.8: Preferencias del AHP difuso en matrices de comparación por pares para el nivel de sub-criterios.

	C_{21} Tipo de vía (Complejidad)	C_{22} Costos de Trans. (Impedancia)	C_{23} Sinuosidad	W_N
C_{21}	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.333, 1.000, 1.000)	(1.000, 3.000, 5.000)	0.42
C_{22}	(1.000, 1.000, 3.000)	(1.000, 1.000, 1.000)	(2.000, 4.000, 6.000)	0.46
C_{23}	(0.200, 0.333, 1.000)	(0.167, 0.250, 0.500)	(1.000, 1.000, 1.000)	0.12

localización de una planta de bioenergía. Se observa que los puntos de biomasa localizados hacia el centro del departamento e identificados con puntos negros en el mapa representan las mejores alternativas. En total, se han determinado 12 sitios ideales para instalar una planta de bioenergía utilizando este enfoque (puntaje entre 0.69 y 0.86) como método de clasificación. La capacidad de estas plantas bioenergéticas varía entre 52,475 y 146,791 t/año; correspondientes a 171 y 479 TJ/año, respectivamente. De acuerdo con los resultados, los puntos con la mayor disponibilidad de biomasa concentran cerca del 36.8% (146,917 t/año) de la energía potencial disponible de los residuos de cacao. Además, es posible construir una cadena de suministro de biomasa entre los puntos vecinos para que sirvan como centros de recolección estratégica.

4.4.5. Análisis de Sensibilidad

En la primera parte del análisis de sensibilidad, los pesos relativos de cada criterio fueron perturbados de forma independiente a partir del incremento/decremento del porcentaje de cambio en una magnitud del $\pm 25\%$ (β en la ecuación 4.12). Cada opción se asoció con el cálculo del índice de idoneidad para generar una nueva distribución del mapa de idoneidad con respecto a la condición base (Fig. 4.5b). Como se señaló

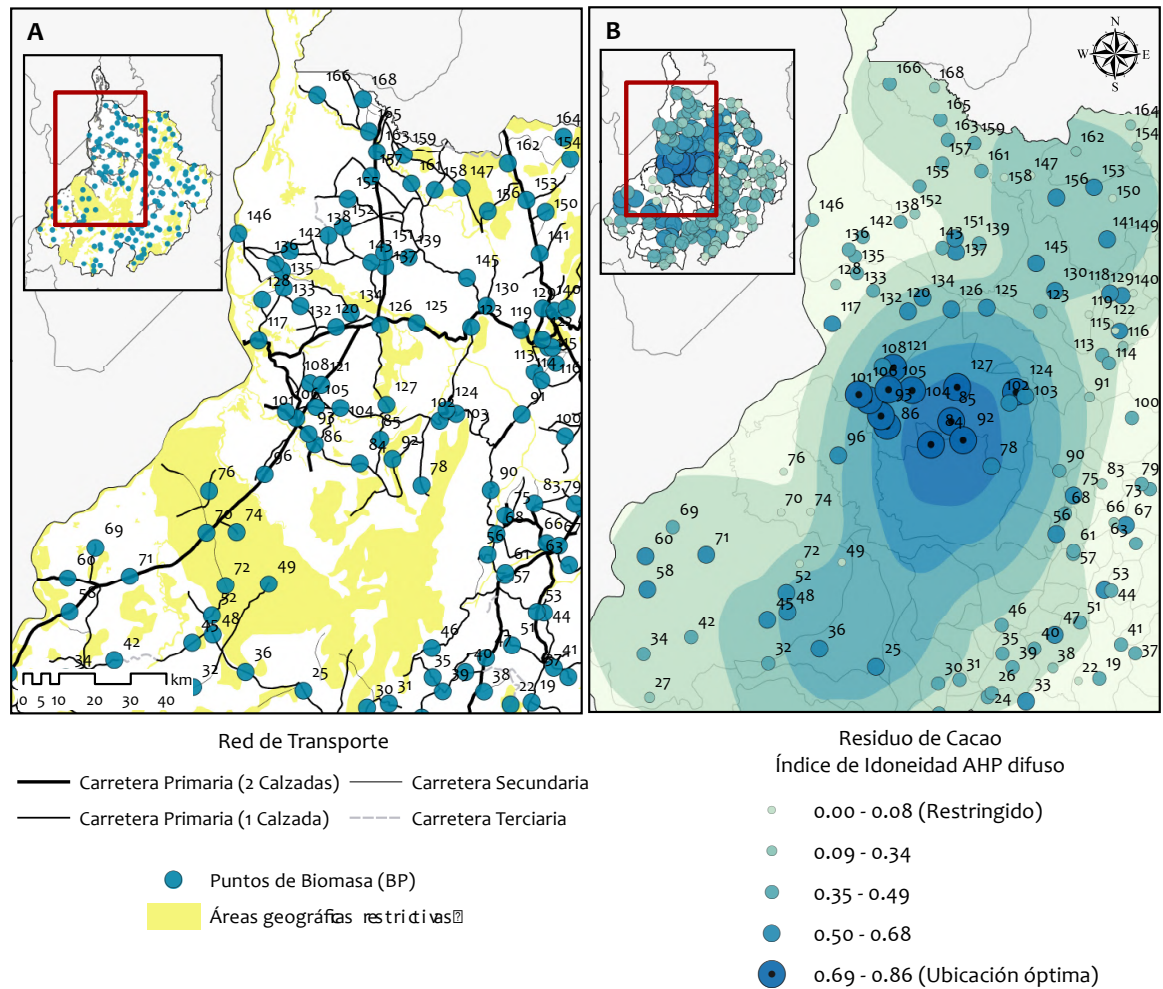


Figura 4.5: a. Mapa de la red de transporte, los sitios potenciales para una planta de bioenergía y las áreas geográficas restrictivas, b. Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de cacao.

anteriormente, se creó un índice numérico (índice de idoneidad), entre “0” y “1” para evaluar la viabilidad de cada PB. Por lo tanto, valores cercanos a “0” indican sitios inadecuados, mientras que valores cercanos a “1” implican una ubicación factible. Para asegurar la comparabilidad, las categorías en el análisis de sensibilidad se crearon por intervalo manual, utilizando como referencia los límites de las categorías determinadas por la optimización de Jenks (quiebres naturales) para el caso base.

La Tabla 4.9 muestra los resultados del análisis de sensibilidad para el conjunto de escenarios de prueba según la nueva distribución de ponderación de criterios. En cada escenario, los puntajes para cada sitio se resumen y los PB prioritarios se identifican

sobre la base de los puntajes más altos. El análisis revela que los resultados son sólidos para un intervalo de $\pm 25\%$ para cada criterio. Los sitios más adecuados para la instalación de plantas de biomasa, caracterizados por una gran disponibilidad de biomasa y atributos técnicos y logísticos favorables, corresponden al puntaje más alto identificado por línea de base.

Por ejemplo, el peso asignado a la disponibilidad de biomasa [C1 (-) y C1 (+)] tendría que aumentarse (o reducirse) a más del 25% para afectar los resultados esperados, en el nivel correspondiente al Sin embargo, las variaciones más amplias se encuentran en el cuarto corte natural, donde el número de PB varía ampliamente, lo que indica una mayor influencia de este criterio en el análisis, como era de esperar. Los resultados con respecto a otros criterios (C2 y C3) son similarmente robustas. Como lo indica la Figura 7, los cambios asociados con los pesos de los criterios no causaron ninguna alteración en las decisiones de preferencia final en un rango de $\pm 25\%$. El área solapada (área gris) describe El mejor sitio evaluado. Los mejores sitios adecuados identificados en los escenarios de prueba y los del caso original no varían significativamente de un caso a otro, por lo que el resultado de referencia es muy sólido en este contexto.

Tabla 4.9: Resultados de análisis de sensibilidad para escenarios de ensayo y caso base

	Caso Base	C ₁ (-)	C ₁ (+)	C ₂ (-)	C ₂ (+)	C ₃ (-)	C ₃ (+)	Caso I	Caso II	Caso III
\mathcal{W}_1	0.48	0.36	0.60	0.53	0.43	0.51	0.45	0.00	0.70	0.60
\mathcal{W}_2	0.31	0.38	0.24	0.23	0.39	0.33	0.29	0.60	0.00	0.40
\mathcal{W}_3	0.21	0.26	0.16	0.23	0.19	0.16	0.26	0.40	0.30	0.00
<i>Estadísticas básicas</i>										
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	0.86	0.88	0.85	0.86	0.87	0.85	0.87	0.95	0.94	0.89
Media	0.41	0.46	0.35	0.39	0.42	0.38	0.43	0.60	0.32	0.35
Mediana	0.43	0.51	0.37	0.41	0.45	0.40	0.47	0.70	0.29	0.35
SD	0.21	0.22	0.20	0.21	0.22	0.21	0.21	0.28	0.20	0.22
<i>Número de PB por nivel</i>										
Restringido	21	19	21	19	21	21	19	19	19	28
2	35	25	62	38	31	36	25	8	108	56
3	62	30	59	63	62	61	49	20	21	49
4	38	78	12	35	39	37	60	23	10	20
Óptimo	12	16	14	13	15	13	15	98	10	15

En la segunda parte del análisis de sensibilidad, los pesos de los criterios relativos

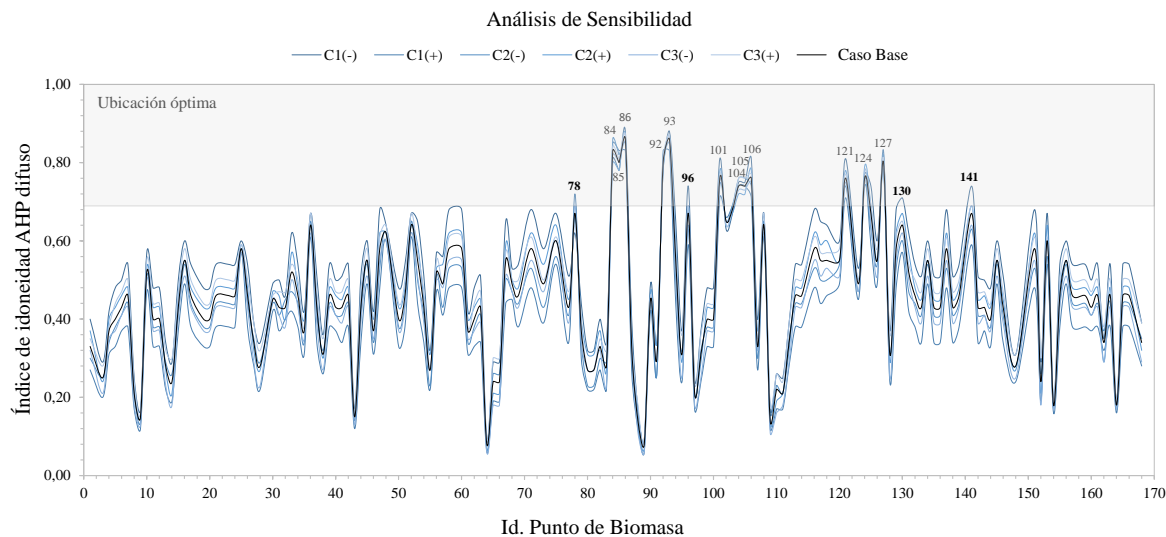


Figura 4.6: Análisis de sensibilidad de la clasificación individual de los sitios candidatos (BP) según el escenario considerado. El área gris indica la región en la que el índice de idoneidad muestra las mejores ubicaciones.

se modificaron para representar los casos extremos en el modelo de decisión (Tabla 9). Para el caso 1, se descuida el efecto de la disponibilidad de biomasa (C1). Para el caso 2, se ignora el factor económico de transporte (C2), mientras que el caso 3 ignora la factibilidad de la pendiente (C3). Los histogramas de los tres casos elaborados para realizar el análisis de sensibilidad (Figura 4.7) revelan que el número de BP de cada intervalo en el caso base es diferente en comparación con los casos 1–3, lo que significa que cada criterio seleccionado influye en la evaluación de sitios potenciales. Para el caso base (Figura 4.7a), se puede deducir que la distribución de PB sigue una tendencia cuasi gaussiana con una puntuación media de alrededor de 0.41, mientras que las puntuaciones más altas oscilan entre 0.68 y 0.86.

Al principio, los resultados del Caso 1 se muestran en la Figura 4.7b. Para este caso se puede observar que el puntaje promedio alcanza un valor de 0.73, representando el factor más restrictivo en el modelo de decisión. De manera similar, cuando la importancia del factor de costo de transporte disminuyó, deje de aplicar una penalización en aquellos PB ubicados en carreteras secundarias, manteniendo un puntaje promedio más bajo que en el caso base (Figura 4.7c). Esto sugiere que los problemas de logística y transporte tendrían una influencia decisiva en el uso energético de la biomasa a nivel regional. Finalmente, cuando la ponderación de la factibilidad de la pendiente disminuye

hacia cero, se observó un ligero desplazamiento hacia la izquierda en las puntuaciones generales (Figura 4.7d). Como era de esperar, este criterio ha ayudado a disminuir la clasificación general del conjunto de PB, debido a la rentabilidad y viabilidad para explotar áreas de difícil acceso relacionadas con la instalación de recolección de residuos de cultivos.

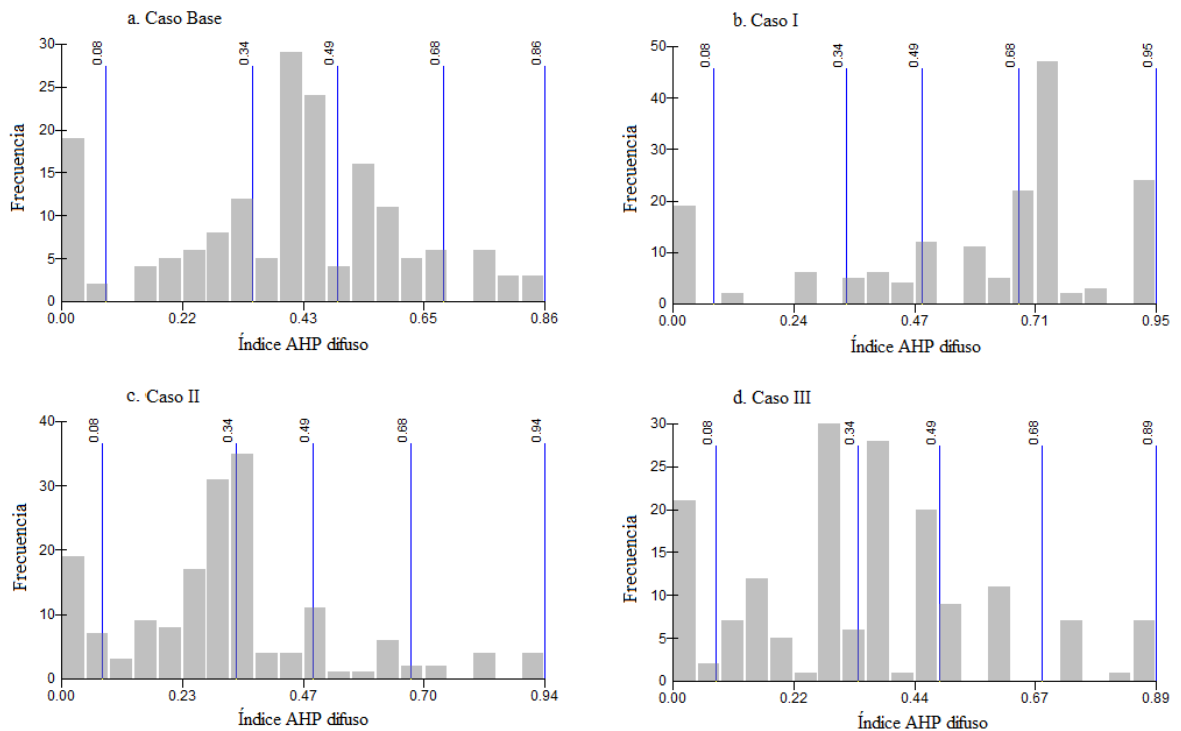


Figura 4.7: Distribución (histograma) del índice de idoneidad obtenido de (a) Caso Base, (b) Caso I: Influencia de la disponibilidad de recursos, (c) Caso II: Influencia del factor económico de transporte y (d) Caso III: Influencia de la viabilidad de la pendiente. El eje X indica la puntuación MCDA difusa, el eje Y representa el número de BP. Los quiebres naturales del caso base fueron usados como referencia para fines de comparación.

El análisis de sensibilidad muestra cómo la metodología propuesta se puede aplicar al desarrollo de un sistema basado en biomasa en la etapa de identificación de sitios adecuados. Aunque los diversos criterios pueden tener una importancia diferente para cada parte interesada, se deben considerar todos los criterios al comparar las alternativas (es decir, ningún criterio por sí solo funcionaría como factor de umbral para excluir alternativas). En el anexo E, se muestran los resultados de la metodología aplicada a cada uno de los cultivos en estudio.

4.5. Conclusiones

Una metodología multicriterio AHP difusa integrada a Sistemas de Información Geográfica, fue desarrollada e implementada para localizar sitios estratégicos en el departamento de Santander para localizar plantas de bioenergía. Estos sitios potenciales se determinaron mediante análisis de exclusión aplicado a los datos estadísticos de la distribución de la biomasa residual de cacao en la región como caso de estudio. Los sitios más adecuados fueron identificados hacia el centro del departamento, en áreas de alta disponibilidad y fácil acceso al residuo, concentrando 36.8% (146,917 t/año) de la energía potencial disponible. Potencial que puede ser utilizado como materia prima en tratamientos térmicos o biológicos.

Estos sitios potenciales fueron evaluados en orden de presentar un índice de idoneidad de los sitios candidatos a escala regional. Los costos de logística y transporte, las restricciones geográficas, la aptitud de la tierra para la actividad agrícola y la disponibilidad de biomasa en el área de estudio fueron tenidos en cuenta y demostraron ser lo suficientemente sensible para detectar diferencias medias significativas entre el conjunto de alternativas, tanto en relación a la calidad subjetiva de los criterios de evaluación, como a la capacidad de reconocer el lenguaje ambiguo e interpretarlo. La metodología mostró 11 sitios ideales en la región para instalar la planta de bioenergía con una capacidad que varía entre 52 y 146 t/año, aproximadamente (correspondiente a 171 y 479 TJ/año en promedio).

De acuerdo con el análisis de sensibilidad, el factor de disponibilidad de biomasa es el parámetro más crítico en la selección de sitios potenciales. Por lo tanto, el peso de los criterios juega un papel importante en la medición de los valores de puntaje general de las alternativas. Un cambio en los coeficientes de peso puede tener un efecto significativo en la selección de sitios adecuados; además el número de criterios depende ampliamente de la disponibilidad de datos cuantitativos y cualitativos. Esta metodología demostró ser lo suficientemente flexible para ser aplicada a otras zonas de estudio con características geográficas totalmente distintas.

Referencias

Anane, M., Bouziri, L., Limam, A., & Jellali, S. (2012). Ranking suitable sites for irrigation with reclaimed water in the nabeul-hammamet region (tunisia) using gis

- and ahp-multicriteria decision analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 36–46.
- Asadullah, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201–215.
- Azasi, V. D., Offei, F., Kemausuor, F., & Akpalu, L. (2020). Bioenergy from crop residues: A regional analysis for heat and electricity applications in Ghana. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105640.
- Caniani, D., Labella, A., Lioi, D. S., Mancini, I. M., & Masi, S. (2016). Habitat ecological integrity and environmental impact assessment of anthropic activities: A GIS-based fuzzy logic model for sites of high biodiversity conservation interest. *Ecological Indicators*, 67, 238–249.
- Çetinkaya, C., Özceylan, E., Erbaş, M., & Kabak, M. (2016). GIS-based fuzzy MCDM approach for siting refugee camp: A case study for southeastern Turkey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, 218–231.
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655.
- Chang, N.-B., Parvathinathan, G., & Breeden, J. B. (2008). Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 139–153.
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1582–1591.
- Escalante, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H., Cardona Ruiz, M., & Duarte Ortega, M. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Honorato-Salazar, J. A. & Sathukhan, J. (2020). Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 1–19.

- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography*, 7(1), 186–190.
- Kahraman, C., Kaya, İ., & Cebi, S. (2009). A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34(10), 1603–1616.
- Kaya, T. & Kahraman, C. (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy vikor & ahp methodology: The case of istanbul. *Energy*, 35(6), 2517–2527.
- Kim, J., Realff, M. J., Lee, J. H., Whittaker, C., & Furtner, L. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an milp model. *Biomass and bioenergy*, 35(2), 853–871.
- Kordi, M. & Brandt, S. A. (2012). Effects of increasing fuzziness on analytic hierarchy process for spatial multicriteria decision analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(1), 43–53.
- López-Rodríguez, F., Atanet, C. P., Blázquez, F. C., & Celma, A. R. (2009). Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of spain, caceres. *Biomass and Bioenergy*, 33(10), 1358–1366.
- Malczewski, J. & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Springer.
- Martínez, S. (2009). *Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña*. PhD thesis, Tesis Doctoral, Universidad de Girona, 2009. ISBN: 978-84-692-5161-4.
- Monzonís, E. J. M. (2011). *Estudio sobre el aprovechamiento integral de biomasa residual en Enguera*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València. Escola Politècnica Superior de Gandia.
- Mosadeghi, R., Warnken, J., Tomlinson, R., & Mirfenderesk, H. (2015). Comparison of fuzzy-ahp and ahp in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 54–65.

- Narula, S. C., Vassilev, V., Genova, K., & Vassileva, M. (2003). A partition-based interactive method to solve discrete multicriteria choice problems. *Cybernetics and Information Technologies*, 2, 55–66.
- Omitaomu, O. A., Blevins, B. R., Jochem, W. C., Mays, G. T., Belles, R., Hadley, S. W., Harrison, T. J., Bhaduri, B. L., Neish, B. S., & Rose, A. N. (2012). Adapting a gis-based multicriteria decision analysis approach for evaluating new power generating sites. *Applied Energy*, 96, 292–301.
- Perpina, C., Alfonso, D., Pérez-Navarro, A., Penalvo, E., Vargas, C., & Cárdenas, R. (2009). Methodology based on geographic information systems for biomass logistics and transport optimisation. *Renewable Energy*, 34(3), 555–565.
- Singh, J., Panesar, B., & Sharma, S. (2010). A mathematical model for transporting the biomass to biomass based power plant. *Biomass and bioenergy*, 34(4), 483–488.
- Sultana, A. & Kumar, A. (2012). Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. *Applied Energy*, 94, 192–201.
- Vahidnia, M. H., Alesheikh, A. A., & Alimohammadi, A. (2009). Hospital site selection using fuzzy ahp and its derivatives. *Journal of environmental management*, 90(10), 3048–3056.
- Velazquez-Marti, B. & Fernandez-Gonzalez, E. (2010). Mathematical algorithms to locate factories to transform biomass in bioenergy focused on logistic network construction. *Renewable Energy*, 35(9), 2136–2142.
- Yagi, K. & Nakata, T. (2011). Economic analysis on small-scale forest biomass gasification considering geographical resources distribution and technical characteristics. *Biomass and bioenergy*, 35(7), 2883–2892.

5

Bioenergía en Santander

La implementación de las tecnologías de digestión anaerobia, pirólisis y gasificación en la producción de bioenergía a partir de residuos de cultivos en la región de Santander requiere el desarrollo de herramientas de decisión para evaluar su viabilidad y sostenibilidad. En este capítulo se construyó un sistema de soporte de decisiones espaciales (SDSS) para ayudar a los interesados a seleccionar la materia prima adecuada de acuerdo con la salida de cada tecnología, identificar la ubicación más adecuada para las instalaciones energéticas, determinar la capacidad óptima de la planta y la arquitectura de la cadena de suministro, y evaluar los riesgos y costos asociados.

5.1. Introducción

El interés en fuentes de energía alternativa está aumentando en respuesta a la preocupación expresada por la sociedad civil y los gobiernos respecto a la seguridad e independencia energética y los impactos ambientales y climáticos asociados con el uso de recursos energéticos no renovables (Demirbas et al.; 2009; Kishita et al.; 2017). Los residuos de cultivos tienen características únicas y deseables como materia prima para la producción de biocombustibles, incluidos los bajos costos de adquisición, alta disponibilidad y grandes tasas de producción (Cherubini; 2010). Sin embargo, aunque estos subproductos agrícolas ofrecen una alternativa a los combustibles tradicionales derivados del petróleo, también tienen características específicas que limitan su uso y consolidación como portadores de energía (Al-Hamamre et al.; 2017). En consecuencia, varios desafíos arduos en el desarrollo sostenible deben superarse antes de que su puesta en marcha a escala comercial pueda realizarse (Srirangan et al.; 2012).

Colombia es un país de base agrícola, por lo que la mayor parte de la biomasa rural producida consiste en grandes cantidades de residuos derivados de los procesos de corte, mantenimiento y conversión de los cultivos en productos para los mercados locales y de exportación. La agricultura en Colombia produce aproximadamente 71.9 millones de toneladas de biomasa agrícola por año, con una energía correspondiente de 331.7 PJ año⁻¹ (Escalante et al.; 2011). Sin embargo, contrario a este potencial favorable para el crecimiento de una economía basada en bio-recursos, el progreso es muy lento. Por ejemplo, el cultivo del café hace una contribución muy importante a la economía del país, es un cultivo comercial dominante y uno de los productos de exportación más importantes (Garcia-Freites et al.; 2020) y sin embargo, un subproducto como la pulpa de café, que representa aproximadamente el 30 % de la fruta en peso seco (Murthy and Madhava Naidu; 2012), permanece subexplotado.

La generación de biogás utilizando pulpa de café como sustrato representa una solución alternativa para el manejo de este residuo (Corro et al.; 2013). La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico donde la materia orgánica es descompuesta por microorganismos en ausencia de oxígeno. El producto principal es un combustible gaseoso (biogas) compuesto por 50–75 % de metano, 25–50 % de dióxido de carbono, 1–5 % de vapor de agua, 0–5 % de nitrógeno y concentraciones a nivel de trazas de hidrógeno, amoníaco y monóxido de carbono (Hall and Howe; 2012). La DA de residuos orgánicos representa una de las alternativas más atractivas a corto y mediano plazo para la generación de energía. El metano producido puede ser utilizado en reemplazo de los combustibles fósiles, tanto en la generación de calor y electricidad, como en la producción de biocombustibles para vehículos (Lehtomäki et al.; 2008). Sin embargo, su potencial está condicionado a la disponibilidad del recurso, sus características intrínsecas, su digestibilidad y las interacciones de sus componentes nutricionales, y el rendimiento a metano (Yang et al.; 2015; Karellas et al.; 2010).

El biogás ha sido estudiado desde una perspectiva regional, no solo para la producción de energía, sino para la gestión de residuos orgánicos en sistemas agrícolas eficientes y sostenibles (Kulišić et al.; 2015), y el desarrollo socio-económico en zonas rurales (Maghanaki et al.; 2013). Adicionalmente, la tecnología de digestión ofrece numerosas ventajas, como bajos requerimientos de nutrientes, bajo capital y costos operativos, así como flexibilidad en términos de tamaño, de modo que las plantas pueden diseñarse para adaptarse a las materias primas disponibles localmente al tiempo que maximizan la recuperación de recursos y el rendimiento energético. En Colombia, existen tres

impulsores principales para adoptar aplicaciones comerciales de digestión en áreas rurales: (1) la cantidad de desechos generados es alta, (2) la tecnología ha alcanzado casi la comercialización y (3) el país tiene experiencia local en el desarrollo y despliegue de tecnologías de biometanización para la producción de biogás.

Asimismo, la pirólisis y gasificación de la biomasa lignocelulósica se han convertido en alternativas muy atractivas y representativas para la producción de energía y biocombustibles. En el caso de la pirólisis, el producto líquido obtenido (biooil) es de alta densidad y tiene un valor calorífico moderado, que se puede usar en biorrefinerías para mezclar con gasolina y/o diesel (Peters et al.; 2015). Además, la fase gaseosa (gas de síntesis) y el residuo carbonizado (biochar) se pueden usar para satisfacer la demanda interna de energía de una manera que sea económica y ambientalmente eficiente y, en el caso del carbón, para las enmiendas del suelo hacia la agricultura sostenible (Kung et al.; 2015; Windeatt et al.; 2014). En la gasificación, el gas combustible producido puede quemarse en una caldera de gas para impulsar generadores de turbina de vapor, o conducirse directamente a generadores de motor de gas o generadores de turbina de gas. En este contexto, la aplicación comercial de estas tecnologías de conversión termoquímicas en el sector agrícola puede contribuir significativamente a mejorar la seguridad energética y el desarrollo sostenible en las zonas rurales y ofrecer a los agricultores nuevas oportunidades de ingresos (Elghali et al.; 2007).

Para implementar estas tecnologías de transformación energética y aprovechar las oportunidades subyacentes, se debe considerar el perfil de disponibilidad de biomasa regional como un aspecto fundamental para evaluar los riesgos y potenciales. La disponibilidad de biomasa es un fenómeno exógeno, estacional y geográficamente distribuido influenciado por la diversidad de prácticas agrícolas, características edafológicas, fisiográficas y climáticas. Los sistemas de bioenergía centralizada requieren un suministro constante, por lo que la selección de un residuo de cultivo agrícola como materia prima es un desafío importante, que no solo depende de las características físicoquímicas del recurso, sino que cada región debe realizarla en función de su estructura económica y social particular. Desde una perspectiva analítica de decisión, esto lleva a un aumento en la complejidad del tema y la presencia ineludible de altos niveles de incertidumbre. Por lo tanto, es necesario desarrollar una herramienta de toma de decisiones para integrar información biofísica, técnica y socioeconómica a nivel regional.

Un sistema de apoyo a la decisión espacial (SADE/SDSS) es una herramienta basada en sistemas de información geográfica (SIG) que integra teorías, modelos y metodologías

para responder a problemas estructurados y específicos (Irfan et al.; 2017). El diseño de redes regionales para sistemas de biomasa se enfrenta a varios desafíos; cada uno asociado con las distintas etapas de la cadena de suministro de biomasa. Una cadena de suministro para residuos agrícolas en sistemas de bioenergía comprende varias etapas, entre ellas, la recolección, almacenamiento, pretratamiento de la materia prima y, finalmente, su transporte a la planta de conversión central. Distintos estudios se han desarrollado en orden de optimizar la cadena de suministro de biomasa y en consecuencia aumentar la eficiencia y reducir costos (Nixon et al.; 2014; Fan et al.; 2013; Ferrari et al.; 2022). Sin embargo, la optimización se realiza a menudo sin tener en cuenta las características del área de estudio y partiendo de áreas de recolección y red de carreteras homogéneas e idealizadas, corregida en algunos casos con factores tales como la tortuosidad de la carretera (Leboreiro and Hilaly; 2011).

De esta manera, la primera dificultad está relacionada con la logística y el transporte y la necesidad de administrar los datos espaciales necesarios para una evaluación regional (Rentizelas et al.; 2009). No obstante, una segunda dificultad se asocia con la heterogeneidad intrínseca de la biomasa. Una amplia variedad de residuos agrícolas pueden considerarse como materia prima potencial para aplicaciones comerciales de bioenergía. Cada región tiene sus propias fuentes de biomasa, generadas localmente de la agricultura, y cada fuente tiene su propio conjunto de problemas y oportunidades (Cardoen et al.; 2015). Para alcanzar el máximo rendimiento y la flexibilidad de estos procesos, se han realizado varias investigaciones para relacionar las características de la biomasa como materia prima y la salida de la tecnología de interés (Lauwers et al.; 2013; Xu et al.; 2014; Puig-Arnavat et al.; 2013; Sun et al.; 2016). Sin embargo, un objetivo como ese solo puede lograrse mediante la construcción de un sistema de biomasa óptimo que también tenga en cuenta la variabilidad de la demanda, los precios y la disponibilidad de los residuos como aspectos claves interrelacionados.

Otra barrera subyacente es la falta de evidencia de la viabilidad económica de los proyectos de biomasa en curso y que arrojan dudas sobre la sostenibilidad del sistema de biomasa sin subsidios del gobierno (Nomiya et al.; 2014). Aunque numerosos estudios abordan estas dificultades por separado, no existe un precedente de una metodología de toma de decisiones o una herramienta de decisión espacial para abordar este problema desde un punto holístico. El enfoque adoptado aquí se basa en la premisa de que el concepto de sostenibilidad está fuertemente asociado con las relaciones espaciales particulares de la región geográfica, y rechaza el enfoque limitado de sostenibilidad aso-

ciado con las prácticas ecológicas, independientemente de las características espaciales de los sistemas agrícolas.

El objetivo de este capítulo fue desarrollar un sistema de soporte a la decisión espacial que se pueda usar para evaluar el potencial de las tecnologías de digestión anaerobia, pirólisis y gasificación como un sistema integrado para la producción de energía y el tratamiento de residuos agrícolas a nivel regional. Esta herramienta hace posible (1) evaluar los recursos de biomasa, (2) estimar la salida de cada tecnología en función de las características fisicoquímicas de la materia prima y las condiciones operativas, (3) determinar la ubicación y el tamaño de los sistemas de bioenergía mediante la asignación óptima de los suministros de biomasa y (4) realizar la evaluación de la viabilidad técnica y económica. Esta herramienta busca dar soporte a las partes interesadas y a las autoridades nacionales, regionales o locales en orden de desarrollar nuevos modelos de negocios dentro de la sociedad rural centrados en la gestión de residuos de cultivos y energía renovable.

5.2. Metodología

Esta investigación se estructuró en tres etapas: (1) Selección de los residuos agrícolas de la región de Santander disponibles para su tratamiento por digestión anaerobia, pirólisis y gasificación, (2) Diseño preliminar y evaluación técnico-económica del proceso de conversión y (3) evaluación de costos, incluida la optimización de la red de suministro de biomasa del departamento.

5.2.1. Etapa 1: Selección de Residuos Agrícolas

La selección de los residuos agrícolas a considerar como materia prima potencial para aplicaciones comerciales de digestión anaerobia, pirólisis y gasificación se realizó mediante el empleo de la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS) como método de análisis de decisiones con múltiples criterios (MCDM). Los criterios de selección de la materia prima para su transformación, sea biológica o termo-química, se pueden dividir en atributos fisicoquímicos, atributos logísticos y atributos técnicos generales. Un residuo agrícola ideal o adecuado para la producción de bio-energía debe reunir en gran medida los diversos atributos/parámetros que se enumeran a continuación:

- **Atributo 1:** El residuo agrícola debe maximizar sus características fisicoquímicas en orden de aumentar el rendimiento de la tecnología y la calidad del biocombustible producido.
- **Atributo 2:** la biomasa como materia prima se debe encontrar en concentraciones y volúmenes suficientes para permitir la operación continua de una planta de biomasa a escala comercial.
- **Atributo 3:** El residuo agrícola debe provenir de un cultivo tradicional en orden de asegurar su disponibilidad futura.
- **Atributo 4:** El residuo debe maximizar sus características energéticas, densidad, poder calorífico y humedad, en orden de reducir los costos logísticos y de transporte.
- **Atributo 5:** adaptabilidad del proceso de producción de biocombustible al tamaño de las unidades de producción de biomasa y la actitud y conocimiento de los productores.

5.2.1.1. Criterios y alternativas del modelo de decisión

La selección de criterios se realizó teniendo presente los atributos mencionados en la sección anterior y los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. Las alternativas y criterios adoptados se presentan en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, para la digestión, pirólisis y gasificación, respectivamente. El siguiente paso es la obtención de información sobre la importancia relativa de un criterio con respecto a otro. Todas las comparaciones se hacen según el juicio de los autores y se almacena en una matriz denominada matriz de importancia relativa $[A]$. Los términos simétricos de esta matriz serán recíprocos el uno al otro mientras la diagonal será la unidad.

5.2.1.2. Modelo de decisión TOPSIS

La técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS) comprende una comparación entre soluciones de referencia ponderadas que incluyen una solución ideal positiva y la solución ideal negativa. Para calcular la importancia total de las alternativas, es necesario calcular sus distancias desde la solución ideal positiva y negativa simultáneamente. El procedimiento de selección de la mejor alternativa utilizando el método TOPSIS se describe a continuación (Kwok and Lau; 2019):

Tabla 5.1: Parámetros de selección del residuo idóneo para digestión anaerobia

<i>Residuo</i>	<i>Oferta Residuo</i> (<i>kt·año⁻¹</i>)	<i>Potencial Energético</i> (<i>TJ·año⁻¹</i>)	<i>Índice Dispersión</i> (%)	<i>Rend. CH₄</i> (<i>m³kg⁻¹SV</i>)	<i>Tradición</i> (-)
Arracacha, Residuos de poda	4.81	9.60	36.66	0.318	0.794
Aguacate, Cascara	0.58	1.49	42.18	0.242	0.529
Banano, Raquis	5.76	2.47	42.21	0.238	0.683
Banano, Frutos de descarte	0.86	1.52	42.21	0.246	0.683
Banano, Vástago	28.79	16.23	42.21	0.205	0.683
Mora, Residuos de la fruta	2.10	6.96	58.51	0.164	0.280
Cacao, Cacota	178.89	314.40	42.37	0.253	0.112
Cacao, Frutos de descarte	69.21	141.92	42.37	0.209	0.112
Café, Pulpa	31.87	114.36	37.87	0.196	0.327
Fique, Bagazo	10.10	20.40	86.21	0.275	0.451
Guayaba, Frutos de descarte	3.13	4.27	63.51	0.244	0.323
Piña, Frutos de descarte	7.02	11.83	71.94	0.329	0.298
Piña, Residuos de poda	435.12	1169.04	71.94	0.238	0.298
Papa, Hojas y tallos	51.76	191.09	80.32	0.197	0.393
Frijol, Residuos de poda	27.65	58.20	51.37	0.235	0.146
Tomate, Rastrojo	10.27	29.43	39.15	0.197	0.169
Tomate, Frutos de descarte	7.98	9.88	39.15	0.233	0.169
Aguacate, Residuos de poda	1.74	13.21	42.18	0.177	0.529
Guayaba, Residuos de poda	7.30	65.71	63.51	0.287	0.323
Limón, Cascara	5.24	20.61	80.52	0.181	0.535
Mandarina, Cascara	15.26	70.36	35.89	0.107	0.465
Naranja, Cascara interior	8.10	33.27	35.80	0.176	0.679
Naranja, Cascara exterior	3.47	14.71	35.80	0.149	0.679
Caña de panela, Cogollo	347.59	1753.84	30.65	0.084	0.154
Papaya, Hojas y tallos	0.17	0.47	61.34	0.231	0.598
Piña, Cascara	21.05	66.98	71.94	0.287	0.298
Papa, Cascara	8.26	20.88	80.32	0.220	0.393
Papa, Frutos de descarte	16.52	58.73	80.32	0.233	0.393
Frijol, Frutos de descarte	0.28	1.83	51.37	0.191	0.146
Palma de aceite, Raquis	101.01	721.85	46.74	0.205	0.249

- **Paso 1:** Construir la matriz de decisión $\mathbf{D} = (d_{ij})_{M \times N}$ compuesta por M alternativas y N criterios.

Tabla 5.2: Parámetros de selección del residuo idóneo para pirólisis

Residuo	<i>Oferta Residuo (kt·año⁻¹)</i>	<i>Potencial Energético (TJ·año⁻¹)</i>	<i>Índice Dispersión (%)</i>	<i>Rendimiento Bio-oil (%)</i>	<i>Tradición (-)</i>
Cacao, Cacota	178.89	314.40	42.37	51.13	0.112
Cacao, Tallos	33.20	129.02	42.37	46.73	0.112
Café, Pulpa	31.87	114.36	37.87	43.84	0.327
Cebolla junca, Frutos de descarte	3.98	16.71	93.08	53.57	0.573
Limón, Cascara	5.24	20.61	80.52	53.12	0.535
Mandarina, Cascara	15.26	70.36	35.89	61.19	0.465
Naranja, Cascara interior	8.10	33.27	35.80	59.70	0.679
Naranja, Cascara exterior	3.47	14.71	35.80	53.67	0.679
Papaya, Frutos de descarte	0.33	0.69	61.34	46.66	0.598
Papa, Rastrojo	51.76	191.09	80.32	54.40	0.393
Papa, Cascara	8.26	20.88	80.32	56.14	0.393
Papa, Frutos de descarte	16.52	58.73	80.32	53.45	0.393
Tomate, Rastrojo	10.27	29.43	39.15	54.91	0.169
Yuca, Frutos de descarte	5.49	28.33	23.89	42.42	0.107
Café, Tallos	45.18	611.42	37.87	43.69	0.327
Maíz, Tusa	5.01	52.09	17.65	47.60	0.154
Maíz, Capacho	3.89	59.10	17.65	50.86	0.154
Maíz, Hojas	37.09	611.37	17.65	42.91	0.154
Maíz, Rastrojo	17.25	169.58	17.65	41.93	0.154
Caña de panela, Bagazo	270.59	2967.72	30.65	48.66	0.154
Caña de panela, Hojas	53.48	851.71	30.65	50.80	0.154
Cacao, Hojas	31.20	354.61	42.37	52.82	0.112
Mandarina, Residuos de poda	16.28	137.47	35.89	52.02	0.465
Cacao, Frutos de descarte	69.21	141.92	42.37	44.37	0.112
Palma de aceite, Raquis	101.01	721.85	46.74	42.27	0.249
Plátano, Frutos de descarte	8.48	19.81	29.26	49.05	0.222

- **Paso 2:** Normalizar la matriz de decisión **D** mediante la transformación:

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{M \times N} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M d_{ij}^2}} \quad (5.1)$$

- **Paso 3:** Determinar la matriz de decisión normalizada ponderada, multiplicando el vector de pesos w_j con la matriz de decisión normalizada **R**:

$$\mathbf{V} = v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (5.2)$$

Tabla 5.3: Parámetros de selección del residuo idóneo para gasificación

Residuo	<i>Oferta Residuo (kt·año⁻¹)</i>	<i>Potencial Energético (TJ·año⁻¹)</i>	<i>Índice Dispersión (%)</i>	<i>Rend. Gas de Síntesis (Nm³·kg⁻¹)</i>	<i>Tradición (-)</i>
Tomate, Rastrojo	10.27	29.43	39.15	1.620	0.169
Papa, Rastrojo	51.76	191.09	80.32	1.385	0.393
Papaya, Cascara y semillas	0.97	2.25	61.34	1.877	0.598
Papa, Cascara	8.26	20.88	80.32	1.030	0.393
Papa, Frutos de descarte	16.52	58.73	80.32	1.057	0.393
Mandarina, Cascara	15.26	70.36	35.89	1.112	0.465
Naranja, Cascara exterior	3.47	14.71	35.80	1.086	0.679
Limón, Cascara	5.24	20.61	80.52	1.367	0.535
Cacao, Cacota	178.89	314.40	42.37	1.436	0.112
Cacao, Tallos	33.20	129.02	42.37	1.401	0.112
Banano, Vástago	28.79	16.23	42.21	1.949	0.683
Plátano, Frutos de descarte	8.48	19.81	29.26	1.632	0.222
Cacao, Frutos de descarte	69.21	141.92	42.37	1.878	0.112
Papaya, Frutos de descarte	0.33	0.69	61.34	1.530	0.598
Plátano, Vástago	282.69	3327.60	29.26	1.430	0.222
Plátano, Raquis	56.54	673.75	29.26	1.502	0.222
Cacao, Hojas	31.20	354.61	42.37	1.583	0.112
Yuca, Frutos de descarte	5.49	28.33	23.89	1.787	0.107

- **Paso 4:** Determinar la solución positiva ideal V^+ y la solución negativa ideal V^- . La matriz normalizada ponderada \mathbf{V} se utiliza para obtener los residuos de referencia V^+ y V^- , donde ambos residuos de referencia son biomásas hipotéticas, que se supone que tienen las mejores y peores magnitudes de atributos posibles.

$$V^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_N^+\} = \left\{ \left(\max(v_{ij} \mid j \in J_B) \right), \left(\min(v_{ij} \mid j \in J_C) \right) \right\} \quad (5.3)$$

$$V^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_N^-\} = \left\{ \left(\min(v_{ij} \mid j \in J_B) \right), \left(\max(v_{ij} \mid j \in J_C) \right) \right\} \quad (5.4)$$

donde J_B y J_C representan el set de criterios asociados con impactos positivos y negativos, respectivamente.

- **Paso 5:** Calcular las medidas de separación S^+ y S^- , o medidas de distancia a

la solución ideal.

$$S_i^+ = \left[\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^+)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

$$S_i^- = \left[\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^-)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

- **Paso 6:** Determinar el coeficiente de cercanía a la solución ideal:

$$\lambda_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (5.7)$$

Se realiza entonces la clasificación de las alternativas de acuerdo con los valores decrecientes del coeficiente de cercanía λ_i que indica las soluciones opcionales factibles más preferidas y menos preferidas.

5.2.2. Etapa 2: Diseño preliminar y análisis técnico-económico

5.2.2.1. Diseño preliminar de la planta de Digestión Anaerobia

El diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de residuos agrícolas se presenta en la Fig. 5.1. El modelo está diseñado para el caso de la generación simultánea de calor y energía a partir de estos recursos, así como la producción de un fertilizante como subproducto. El proceso de digestión consta de cinco áreas técnicas básicas: (1) pre-tratamiento, (2) digestión anaeróbica, (3) tratamiento del gas de salida, (4) generación de vapor-energía y (5) separación de subproductos. A continuación, se presentan algunas presunciones realizadas en el diseño del proceso de digestión anaerobia:

1. La etapa de pre-tratamiento incluye una sección de almacenamiento y trituración de los residuos agrícolas. Se parte del supuesto de que estos residuos se almacenan a campo abierto en los sitios de cultivo, por lo que su humedad es muy heterogénea. Por esta razón, después de la trituración, el residuo se transporta a un tanque de ecualización para lograr valores de humedad y pH ideales (Sganzerla et al.; 2021). En este estudio, se asume que el 5% del sustrato como materia prima se pierde en la sección de pre-tratamiento.

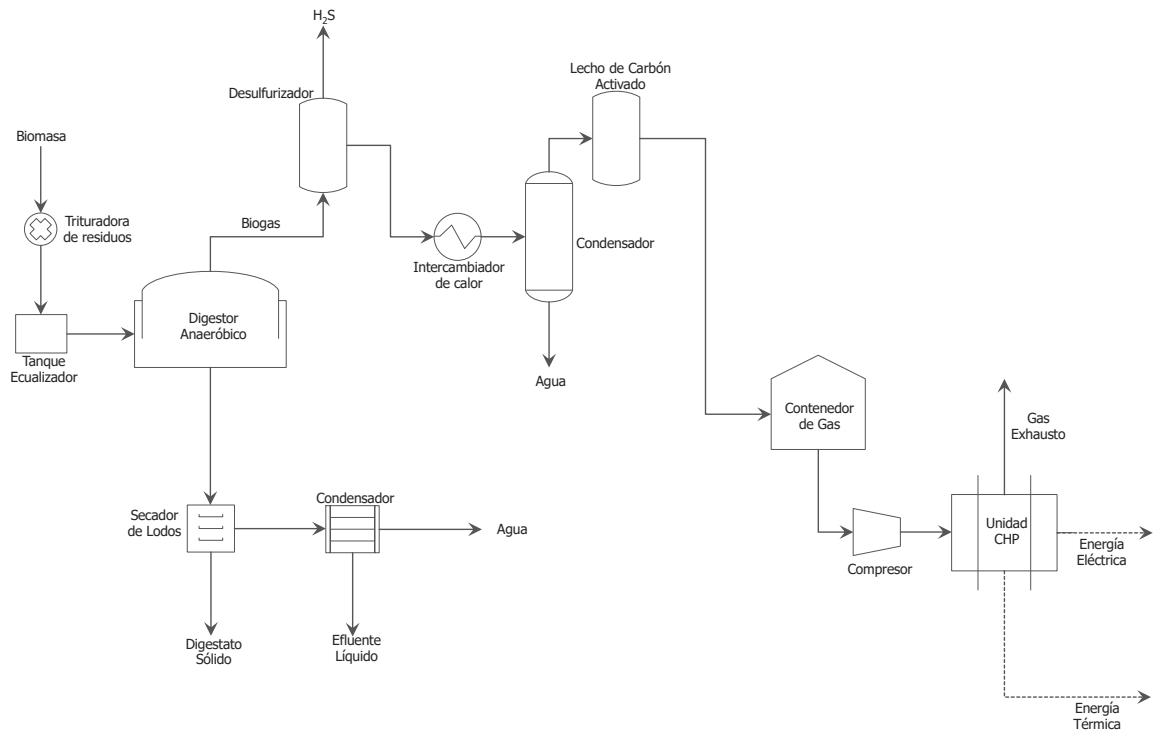


Figura 5.1: Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de residuos agrícolas

- El proceso de digestión anaeróbica se modela como una digestión húmeda a condiciones mesófilas ($35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$); común en plantas de mediana y gran escala (Aui et al.; 2019). El Rendimiento a metano se presentó anteriormente en el capítulo 2. El rendimiento potencial a biofertilizante se determinó con base en el modelo propuesto por Ngumah et al. (2013), que establece que solo el 60% de los sólidos volátiles se convierte en biogás:

$$P_B = (DM - SV) + 0.4SV \quad (5.8)$$

donde P_B es el rendimiento potencial a biofertilizante (base seca) de cada residuo orgánico, DM es la masa del componente sólido (masa seca), y SV son los sólidos volátiles, que corresponde a la porción de DM que puede convertirse potencialmente en gas.

- Tras la digestión, el biogás obtenido fue tratado y luego enviado a una unidad CHP para ser quemado y utilizado para la producción de energía eléctrica y térmica. El digestato obtenido de la digestión se trató en un secador de lodos para recuperar

agua y producir un fertilizante rico en nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) para uso agrícola (Buller et al.; 2021). Se asume que el 65 % del biogas producido es metano, que $1m^3$ de este biogas produce aproximadamente 2.1 kWh de energía eléctrica y 10.8 MJ de energía térmica; asumiendo una eficiencia eléctrica de 0.35 y una eficiencia térmica de 0.50.

4. Los contaminantes del biogás incluyen: amoníaco, vapor de agua y sulfuro de hidrógeno. La eliminación del sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás se realiza mediante adsorción en óxido de hierro Fe_2O_3 , método comúnmente utilizado debido a su madurez industrial. Los niveles recomendados de H_2S en biogás para combustión están en el rango de 200–300ppm (Ghimire et al.; 2021). La remoción del vapor de agua y otros contaminantes disueltos se realiza mediante el uso de un intercambiador de calor (enfriador). El amoníaco se elimina mediante un lecho de carbón activado (Naqi et al.; 2019).

5.2.2.2. Diseño preliminar de la planta de pirólisis

El diagrama de flujo del proceso de producción de bio-oil a partir de residuos agrícolas vía pirólisis se ilustra en la Fig. 5.2. El proceso se divide básicamente en cuatro áreas principales: (1) pretratamiento; (2) conversión; (3) separación y (4) combustión del residuo sólido. Las líneas continuas representan flujos de masa, mientras que líneas discontinuas flujos de calor y/o trabajo. La etapa de conversión se realiza en un reactor de pirólisis en lecho fluidizado, seleccionado debido a su potencial escalamiento y flexibilidad operacional (Do et al.; 2014). Ciclones de alta eficiencia remueven la materia sólida formada en gran parte por el residuo carbonizado y un tren de condensación separa la fase volátil de la fase gaseosa en esta corriente para la recuperación del bio-oil (Wright et al.; 2010). El diseño preliminar de la planta de pirólisis se realizó bajo los siguientes preceptos:

1. El costo de adecuación de la biomasa es un factor primario en el costo de producción del bio-oil. En la práctica, la reducción de tamaño de partícula debe llevarse hasta un diámetro medio de 3mm. Asimismo, niveles de humedad entre 5–15 % en peso se consideran generalmente aceptables para las tecnologías de pirólisis comerciales actualmente en uso. De esta manera, en el pre-tratamiento se incluyeron los procesos de reducción de tamaño y secado.

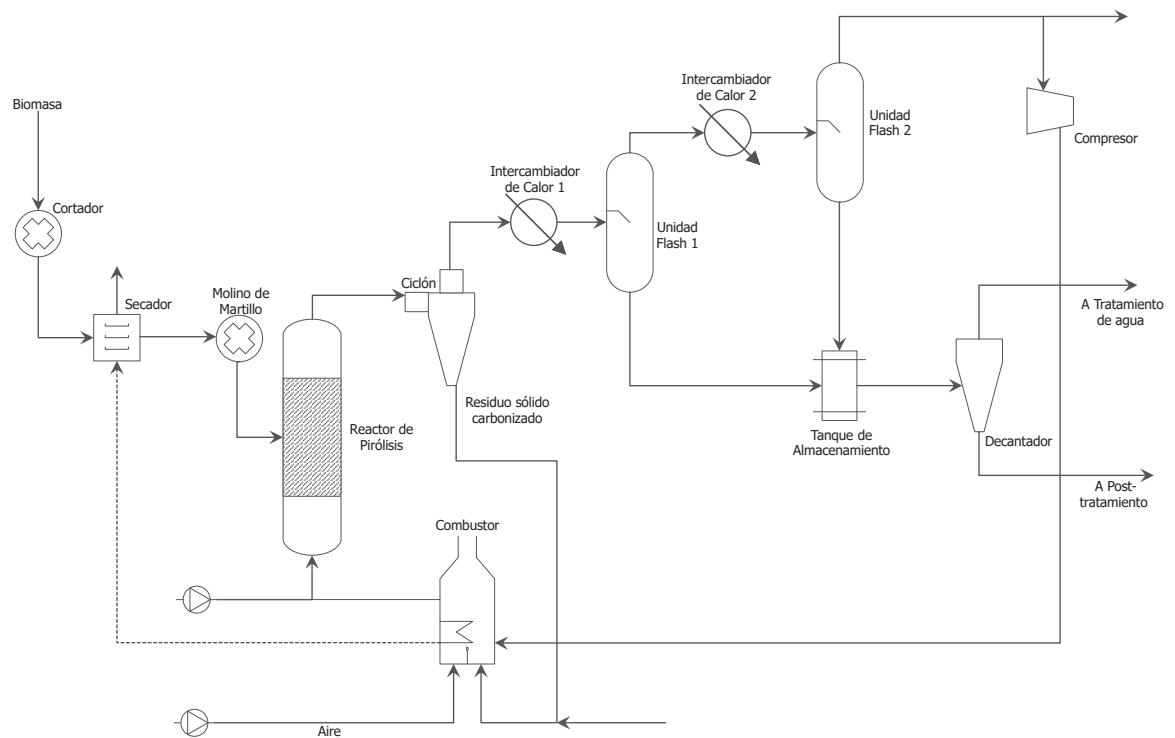


Figura 5.2: Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de residuos agrícolas

2. El rendimiento a bio-oil se presentó anteriormente en el capítulo 2. En esta etapa, se asume que el 100 % de los gases y el 97 % del residuo carbonizado es utilizado para la cubrir la demanda energética de la planta. Si el calor generado por la combustión de estos sub-productos excede la cantidad requerida para la pirólisis, tal exceso de calor será considerado como un *commodity energético* debido a sus potenciales aplicaciones para generar vapor y electricidad.
3. El residuo carbonizado se separa de la corriente de gas en los ciclones y el precipitador electrostático (en caso de ser necesario). La eficiencia de separación se supone entre el 99.5 % y el 99.9 %; por lo que una cantidad marginal de cenizas todavía existen tanto en el bio-gas como en el líquido condensado (bio-oil). En este estudio, todo el bio-char se envía a la cámara de combustión para suministrar calor para la pirólisis de biomasa (Luz et al.; 2015).
4. Para lograr una rápida condensación de los vapores de la pirólisis, se emplearon unidades de vaporización instantáneas desde una temperatura elevada. Se puede asumir que el 30 % en peso del gas no condensable se recicla al reactor de pirólisis

para ayudar a la fluidización, 65 % en peso se quema en la cámara de combustión para generar calor para el proceso de pirólisis, y el restante (5 % en peso) se ventila.

5. El flujo de energía que ingresa con el combustible de biomasa se determina en relación a su poder calorífico, mientras que los flujos de energía de las corrientes de salida se han evaluado en función de la capacidad calorífica del bio-oil determinada experimentalmente por calorimetría de barrido diferencial (DSC).

5.2.2.3. Diseño preliminar de la planta de Gasificación

El diagrama de flujo del proceso de gasificación se ilustra en la Fig. 5.3, el cual fue adaptado de Do et al. (2014). Las configuraciones de diseño para la aplicación industrial de plantas de gasificación pueden esbozarse como una combinación de tres secciones: (1) pre-tratamiento del residuo, (2) producción de gas de síntesis, (3) limpieza de gas de síntesis o gas de combustión y (4) utilización de gas de síntesis para la producción de energía eléctrica. Para el caso de la gasificación de residuos agrícolas, las principales presunciones son las siguientes:

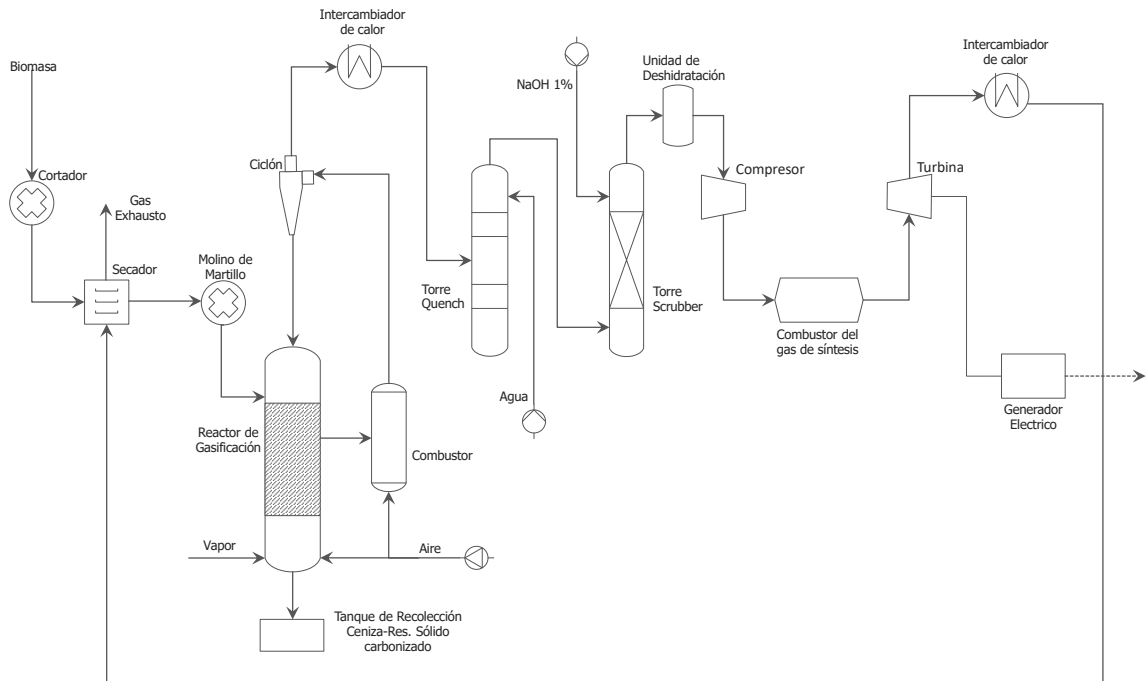


Figura 5.3: Diagrama de flujo del proceso de gasificación de residuos agrícolas

1. Al igual que la pirólisis se requiere un grado de procesamiento de biomasa antes de que pueda ocurrir la gasificación. La mayoría de los gasificadores requieren una materia prima de menor tamaño que la que normalmente se recolecta durante la cosecha. Por lo tanto, es necesario un grado significativo de reducción de tamaño. Además, el contenido máximo de humedad para la gasificación de biomasa es del 20 %-30 % (base húmeda), y para el funcionamiento normal es inferior al 15 % (base húmeda).
2. El gas de síntesis que sale del reactor de gasificación contiene una pequeña cantidad de cenizas volantes, amoníaco, alquitrán y gases ácidos que deben ser eliminados, antes de ser purificado se utiliza para producir vapor o agua caliente mediante un intercambiador de calor. Mediante una torre *Quench* se retira la mayor parte de las cenizas volantes, el alquitrán y una parte de los gases ácidos, una torre *scrubber* elimina casi todo el ácido sulfhídrico (H_2S) y una fracción del CO_2 y una unidad de deshidratación elimina la humedad en el gas de síntesis (Woolcock and Brown; 2013).
3. El gas de síntesis se utiliza para la generación de electricidad. Primero se alimenta a un combustor, que es un horno quemador donde se quema el gas de síntesis para producir gases de combustión calientes que luego se envían a una turbina de gas. El gas de combustión de la turbina de gas se utiliza para producir agua caliente en una unidad de intercambio de calor.

5.2.3. Etapa 3: Modelo de evaluación de costos

En esta sección, se examina la viabilidad técnico-económica del proyecto en consideración, es decir, la implementación y operación de una planta de digestión anaerobia, pirólisis o gasificación basada en las materias primas orgánicas seleccionadas en el modelo de decisión TOPSIS (Sección 5.2.1). El modelo económico se basó en la estimación de la inversión de capital total, los costos de operación y mantenimiento, los costos de suministro de biomasa y los ingresos y ganancias asociados con un proyecto de biomasa. La inversión de capital total, así como los costos de operación y mantenimiento, se estimaron con base en el costo de los equipos y las instalaciones. Se aplicaron factores de contingencia a los costos de los equipos instalados (Peters and Timmerhaus; 2004). Los costes de inversión específicos se analizaron mediante funciones de regresión para

los datos obtenidos de la literatura (Bidart et al.; 2014; Gómez et al.; 2010; Pantaleo et al.; 2013)

El manejo de los residuos de cultivos involucra los costos de compra, recolección, transporte, carga y descarga (Leboreiro y Hilaly, 2011). El precio de los residuos de cultivos fue difícil de estimar debido a la falta de un mercado de biomasa en la región, mientras que el costo de la materia prima se estimó en US\$12,5 por tonelada seca para crear incentivos y oportunidades económicas en los agricultores locales. Los costos de recolección y transporte se determinaron de acuerdo con el modelo presentado en la Sección 2.4 para una cadena de suministro óptima. El monto pagado a los microproductores de energía en Colombia, con base en el valor de referencia anual, es de US\$0.129 por kWh.

5.3. Resultados

5.3.1. Selección de los residuos agrícolas

La evaluación y selección de los residuos agrícolas idóneos para su conversión energética es compleja ya que se evalúan varios criterios en el proceso de toma de decisiones. En un contexto real, es posible que el problema deba abordarse sin la disponibilidad de información precisa. En esta investigación, se seleccionaron siguiendo los criterios enumerados en la sección 5.2.1. Se define así un residuo idóneo como aquel “residuo que puede cumplir con los atributos técnicos establecidos por la tecnología de conversión en cuanto a factores económicos, así como parámetros de calidad, cantidad y sostenibilidad de la cadena de suministro”. Los cinco criterios elegidos para clasificar estos residuos agrícolas fueron la oferta de residuo (C_1), el potencial energético (C_2), el índice de dispersión espacial del residuo (C_3), el rendimiento de la tecnología en relación al producto energético de salida (C_4) y la tradición del cultivo (C_5).

Para cada criterio es fácil decidir la mejor alternativa, pero para el problema de múltiples criterios, la decisión se vuelve compleja ya que para cada criterio las unidades de medida son diferentes y la comparación se debe realizar entre criterios que pueden diferir en importancia de acuerdo a los grupos de interés. En la Tabla 5.4 se presentan el resultado final del proceso de clasificaciones y selección de alternativas obtenidas utilizando TOPSIS. El coeficiente de cercanía a la solución ideal (λ_i) representa la calificación del residuo considerando los criterios presentados anteriormente con sus

Tabla 5.4: Resultados del proceso de selección de los residuos agrícolas por el modelo TOPSIS

<i>Residuo</i>	<i>Distancia a la alternativa no ideal (S^-)</i>	<i>Distancia a la alternativa ideal (S^+)</i>	<i>Score (λ_i)</i>
<i>Digestión Anaerobia</i>			
Piña, Residuos de poda	0.067	0.155	0.698
Caña de panela, Cogollo	0.076	0.158	0.675
Cacao, Fruto de descarte	0.100	0.146	0.406
<i>Pirólisis</i>			
Caña de panela, Bagazo	0.056	0.190	0.772
Palma de aceite, Raquis	0.132	0.120	0.476
<i>Gasificación</i>			
Plátano, Vástago	0.067	0.205	0.754
Cacao, Cacota	0.145	0.133	0.480

respectivos pesos ($w_1 = 0.1283$, $w_2 = 0.1541$, $w_3 = 0.2591$, $w_4 = 0.2823$, $w_5 = 0.1761$). El método TOPSIS, permite calcular la distancia entre las alternativas ideales y anti-ideales; la distancia positiva (S^+) toma significado como la cercanía a la solución ideal, es decir a menor distancia más cercana estará la solución. Por otro lado la distancia negativa (S^-) representa la cercanía a la peor solución posible.

5.3.2. Arquitectura de la cadena de suministro

Desde un punto de vista logístico, la optimización de la cadena de suministro determina posibles rutas para cada recurso de acuerdo con la configuración de red elegida. En este estudio, la red de suministro fue optimizada mediante el modelo de programación lineal entera mixta (MILP), en donde se buscó minimizar el costo de transporte de un determinado residuo desde los orígenes a los destinos. La restricción del problema fue satisfacer la demanda de cada destino sin superar la oferta disponible en cada región. Al construir el modelo de optimización con la distancia entre puntos hipotéticos de biomasa (PB), la oferta en cada uno de ellos y el costo asociado al transporte entre diferentes puntos y el costo total de la planta, se garantiza la minimización en los gastos de transporte.

En las Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se observa la configuración de la arquitectura de la red de suministro del residuo a una hipotética planta de transformación

energética, el área de recolección se definió para cada PB utilizando polígonos de Thiessen y la ruta seleccionada de un punto de la red a otro será la más eficiente en términos de tiempo pero no de distancia. En estas figuras, mediante un pentágono se indicó la mejor ubicación para instalar una planta de aprovechamiento energético partiendo del modelo de decisión discutido en la sección anterior (Ver sección 4) y la optimización de la red. Estos puntos representan el mejor equilibrio entre la accesibilidad física y la cantidad total de recursos disponibles. Así, por ejemplo, en el caso de la digestión anaerobia de los residuos de los residuos de poda de la piña (rastrojo), se evidencia que el sitio marcado con el código 130 representa la mejor ubicación de la planta, mientras que la compleja dispersión geográfica del cultivo del cacao, y en relación sus residuos, dificulta su aprovechamiento como recurso energético a nivel regional de forma centralizada. Así, la fruta de descarte y la cacota proveniente del cacao, presentan ubicaciones distintas para su aprovechamiento energético, y es así porque enfrentan retos logísticos distintos cada uno marcado por la tecnología de conversión; digestión anaerobia para los frutos de descarte y gasificación para la cacota.

5.3.3. Evaluación económica de los costos de transporte

El costo de transporte es uno de los primeros criterios de selección para la instalación de plantas de aprovechamiento energético. El departamento de Santander está ubicado sobre la Cordillera Oriental de los Andes, por lo que una gran parte de sus vías corresponden a “camino secundarios” y “camino terciarios”. El uso de residuos agrícolas para producir vectores energéticos puede estar limitado por la distancia entre los sitios de recolección y la planta. Por lo tanto, se puede incurrir en mayores costos de transporte y emisión de gases de efecto invernadero por una mayor distancia de entrega.

En las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se muestra el efecto del tamaño de la planta sobre los costos de transporte de los residuos seleccionados por el modelo de decisión TOPSIS. El costo del transporte es directamente proporcional a la dispersión geográfica del residuo. Sin embargo, otros factores como la pendiente, la accesibilidad y la densidad bruta del residuo afectan el costo final. Los costos logísticos pueden aumentar significativamente al seleccionar otros modelos de vehículos transporte, y otra arquitectura de la red de suministro no optimizada de acuerdo a los requerimientos de la planta de transformación. El sistemas de recolección de biomasa y las operaciones de campo pueden ser estudiado a mayor detalle en orden de establecer operaciones más eficientes y a una mayor fracción de residuos recolectables.

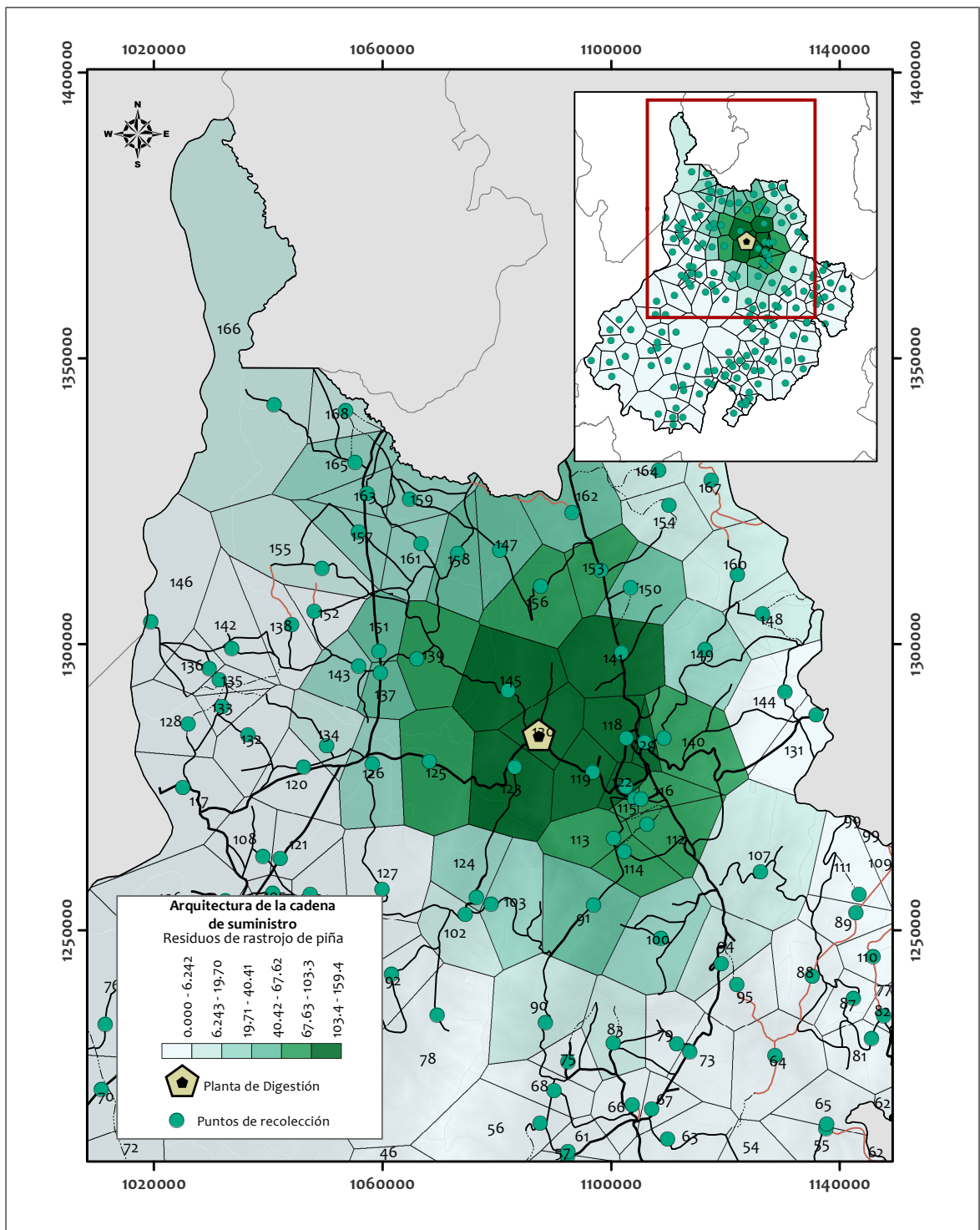


Figura 5.4: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de piña a tratar vía digestión anaerobia

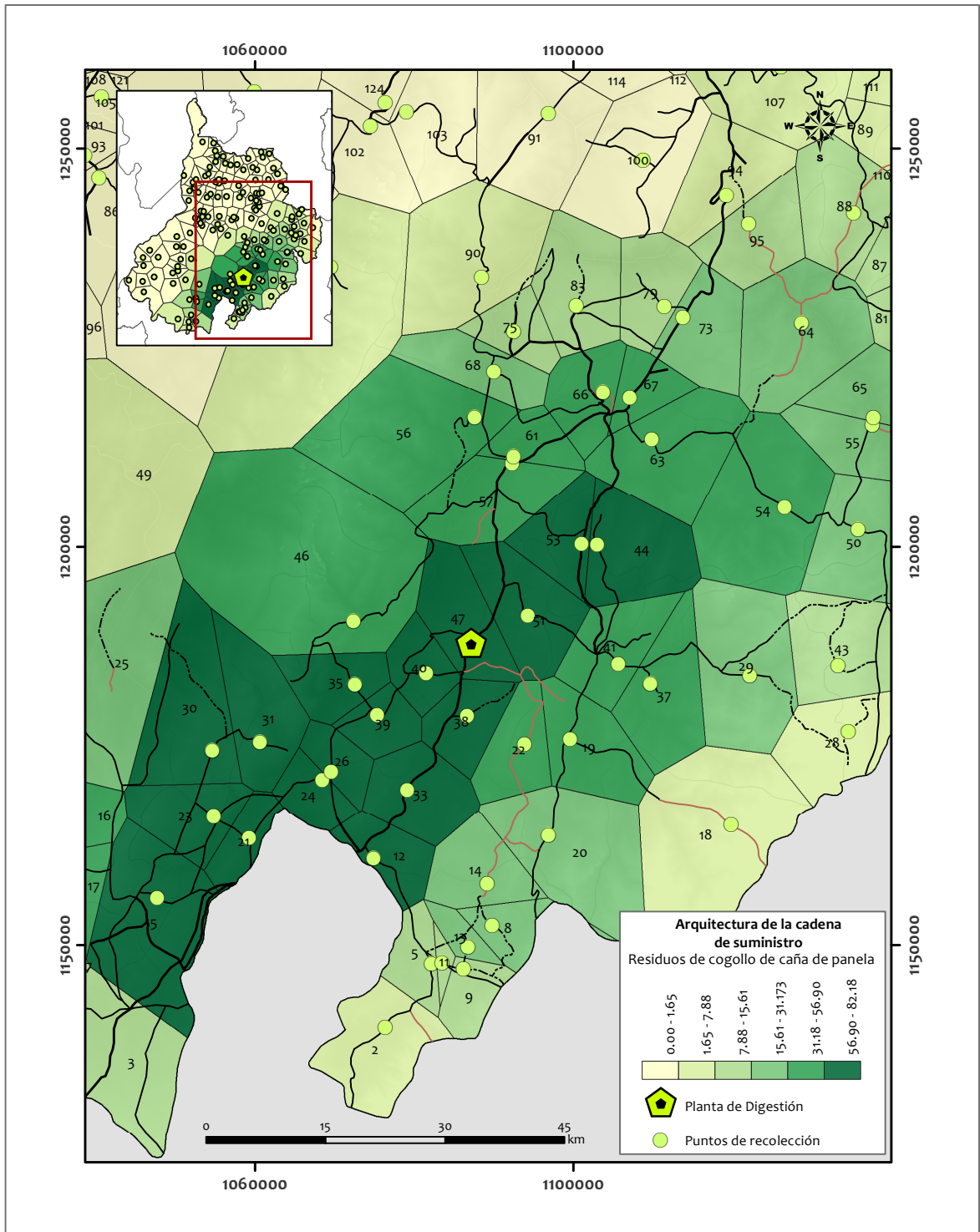


Figura 5.5: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de cogollo de la caña de panela a tratar vía digestión anaerobia

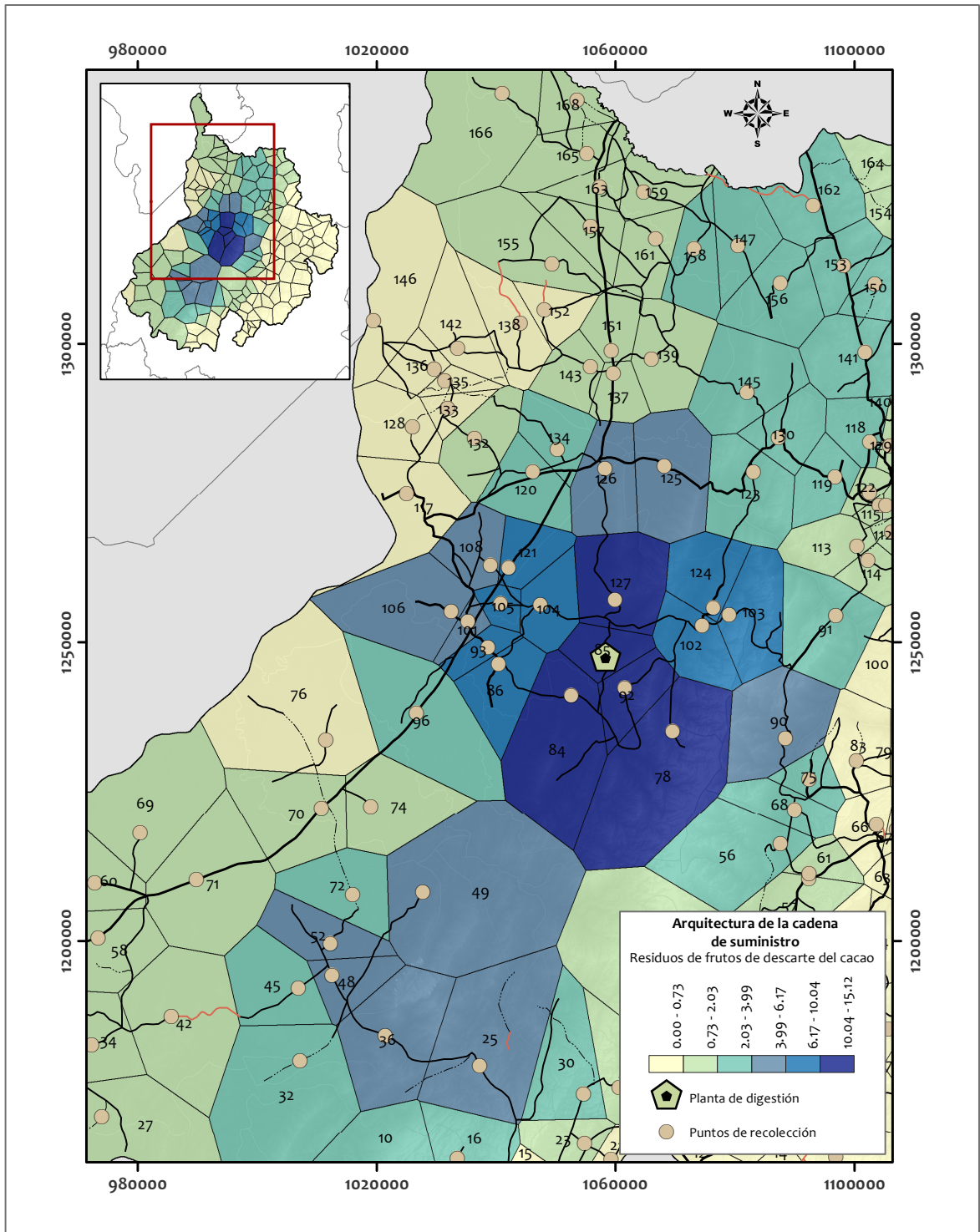


Figura 5.6: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de descarte de cacao a tratar vía digestión anaerobia

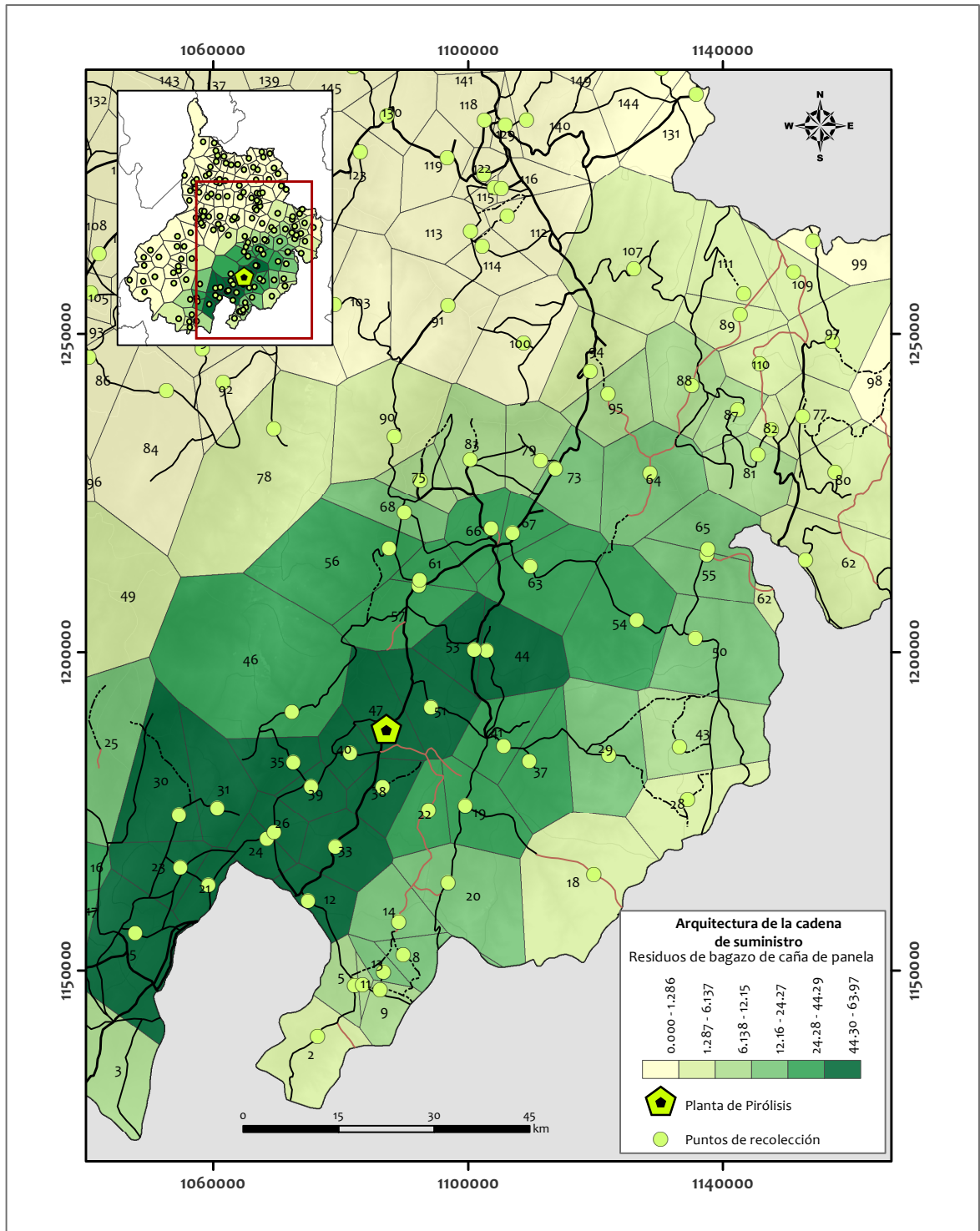


Figura 5.7: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos del bagazo de la caña de azúcar a tratar vía pirólisis

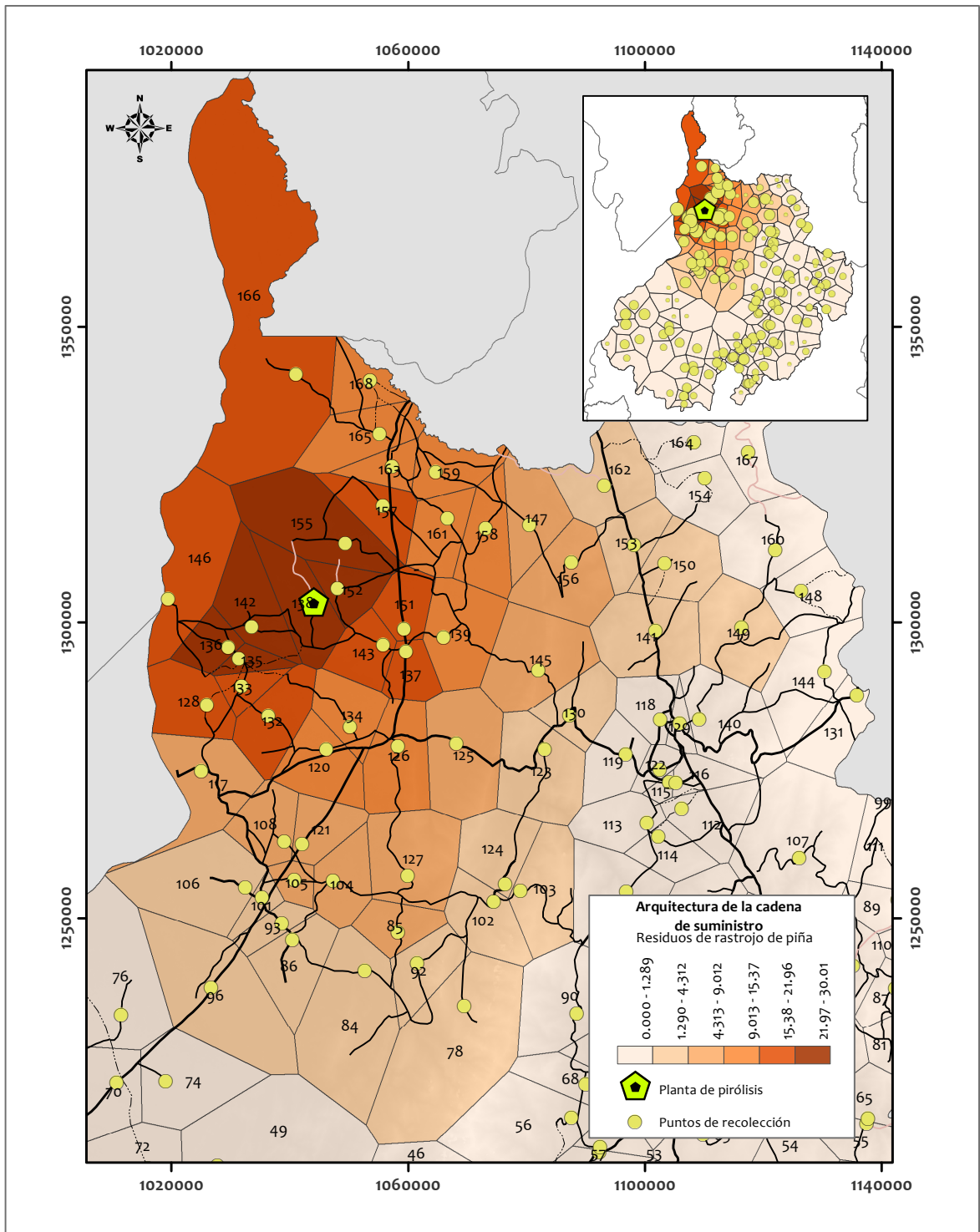


Figura 5.8: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos del raquis de la palma de aceite a tratar vía pirólisis

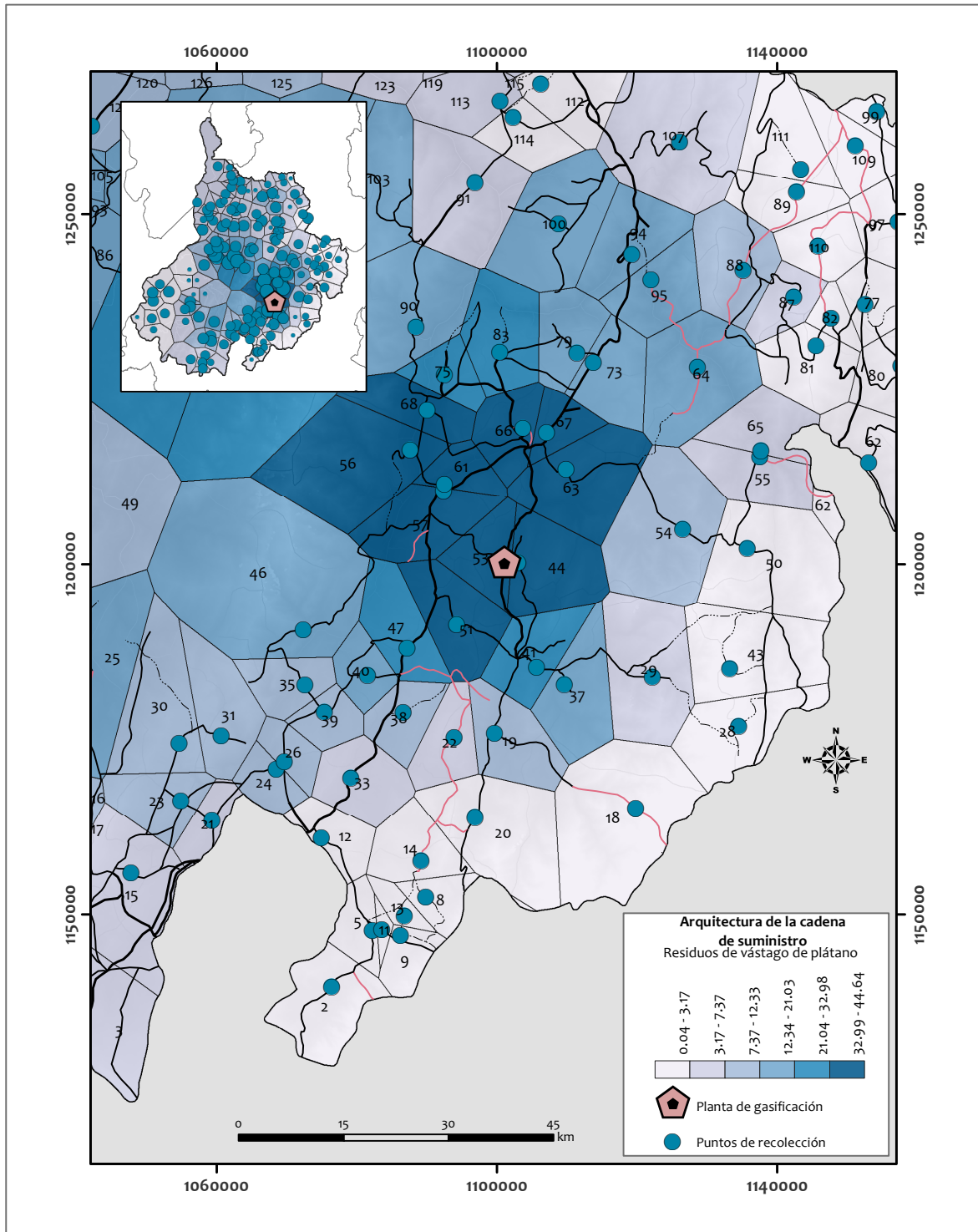


Figura 5.9: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos del vástago del plátano a tratar vía gasificación

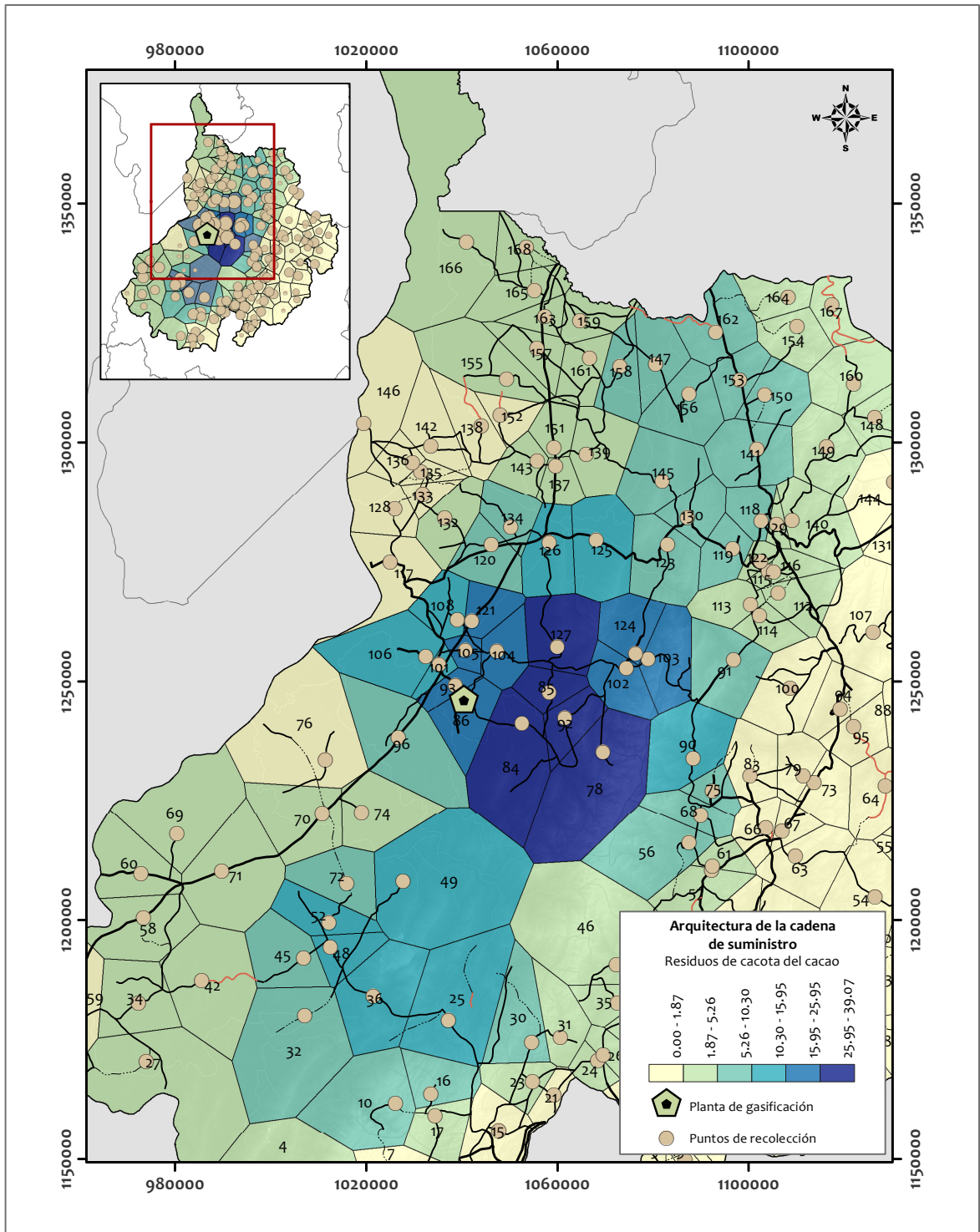


Figura 5.10: Arquitectura de la cadena de suministro para residuos de cacota del cacao a tratar vía gasificación

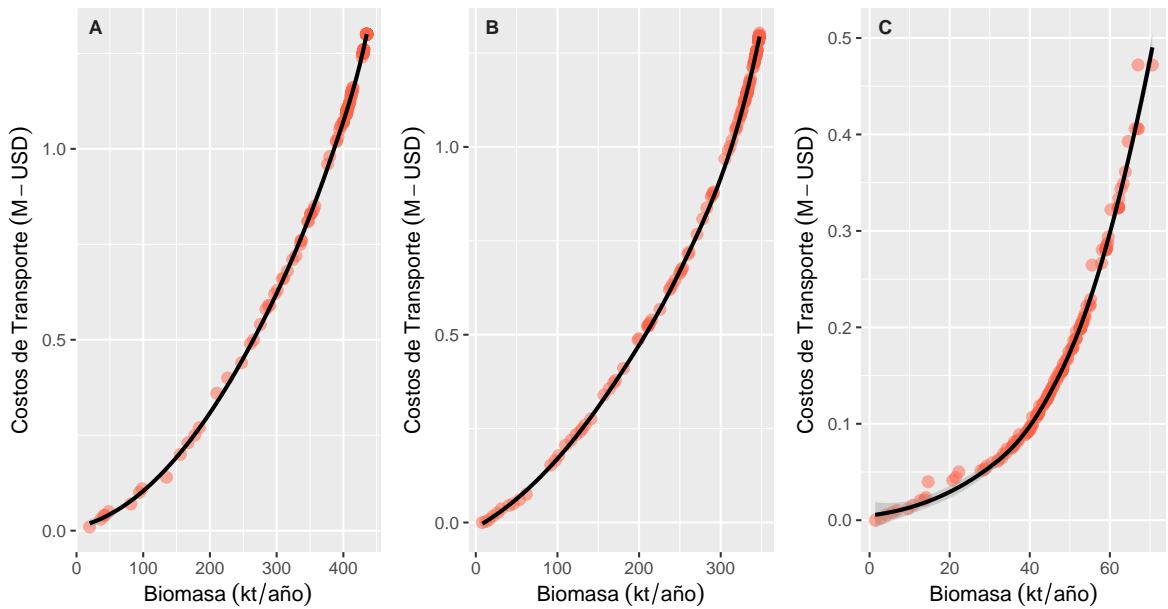


Figura 5.11: Costos de transporte optimizado para la digestión anaerobia de (A) Residuos de poda de piña; (B) Cogollo de la caña de panela; (C) Frutos de descarte del cacao

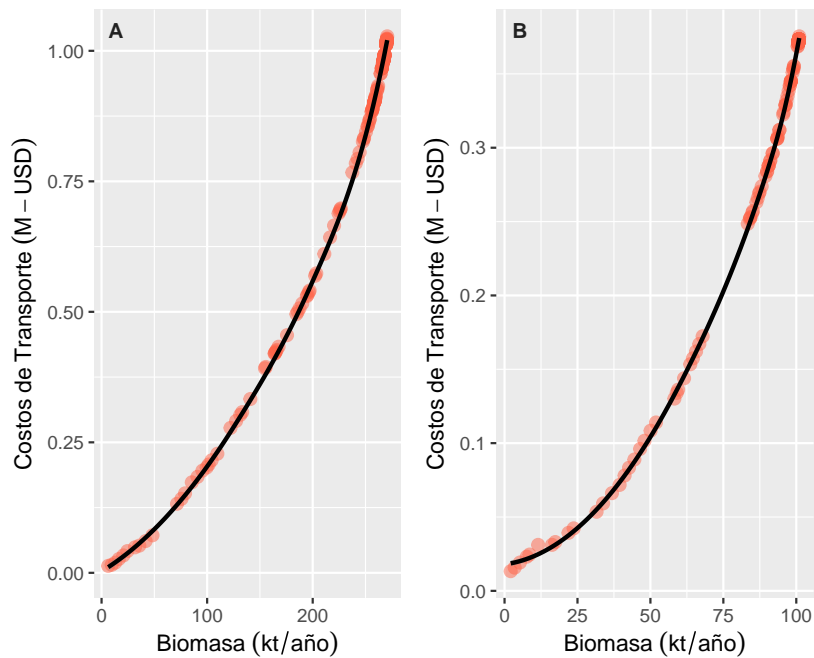


Figura 5.12: Costos de transporte optimizado para la pirólisis de (A) Bagazo de la caña de panela; (B) Raquis de la palma de aceite

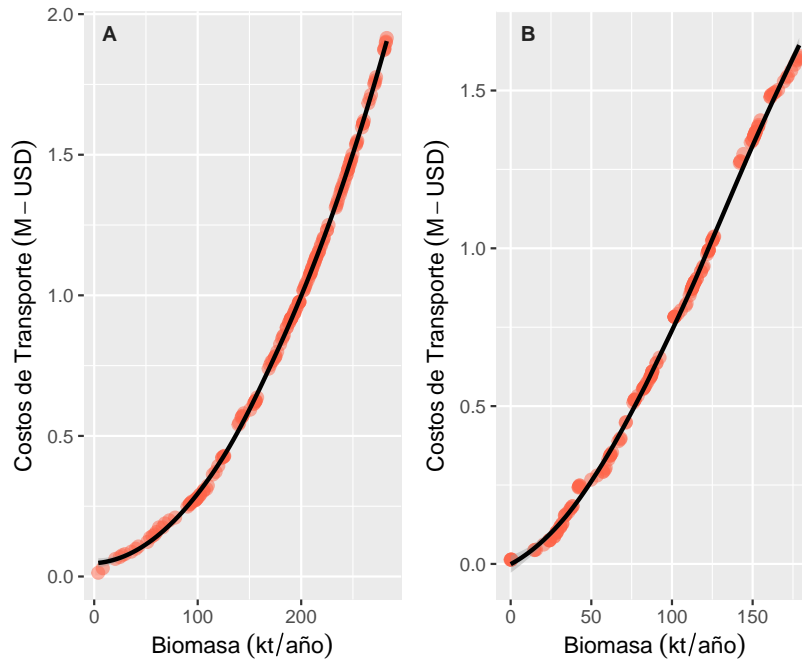


Figura 5.13: Costos de transporte optimizado para la gasificación de (A) vástago de plátano; (B) Cacota de cacao

5.3.4. Evaluación Técnico–Económica

El valor presente neto de la instalación de plantas de digestión, pirólisis y gasificación se evaluó durante una vida del proyecto de 10 años. De los residuos seleccionados como casos de estudio por el modelo de decisión TOPSIS, el rastrojo de la piña para la digestión anaerobia, el bagazo de la caña de panela para la pirólisis y el vástago del plátano para el caso de la gasificación, representan las mejores opciones (ver Tablas 5.5, 5.6 y 5.7). La tasa interna de retorno (TIR) negativa indica que la suma del flujo de caja posterior a la inversión es menor que la inversión inicial, es decir, el flujo de caja no descontado suma un valor que es menor que la inversión. La ventaja de la TIR es que, a diferencia del VPN, permite comparar fácilmente proyectos de tamaños muy diferentes; lo que hace posible determinar tamaños óptimos de planta, y en consecuencia restringiendo las distancias de recolección del residuo.

Las Tablas 5.5, 5.6 y 5.7 incluyen una comparación resumida de los resultados clave de la evaluación económica. se observa que al aumentar la capacidad de planta los costos aumentan hasta un punto de inflexión en el que la función se amortigua. Sin embargo, a un mayor tamaño de planta, las distancias de recolección se hacen mayores

Tabla 5.5: Rentabilidad de instalaciones de digestión anaerobia para varios tamaños de plantas acorde a los residuos seleccionados.

<i>Residuo Agrícola (t/año)</i>	<i>Índice de Rentabilidad (-)</i>	<i>Valor Presente Neto (-)</i>	<i>Tasa Interna de Retorno (-)</i>
<i>Piña, Residuos de Poda</i>			
1000	0.441	\$ -90,843.43	-0.043
5000	1.477	\$ 142,942.82	0.197
10000	1.966	\$ 454,565.46	0.291
25000	2.440	\$ 1,416,811.84	0.384
50000	2.652	\$ 3,038,332.01	0.428
100000	2.757	\$ 6,237,047.82	0.450
200000	2.740	\$ 12,132,952.97	0.447
400000	2.449	\$ 20,017,103.82	0.388
<i>Caña de Panela, Cogollo</i>			
1000	0.124	\$ -134,507.62	-0.165
5000	0.656	\$ -87,591.81	0.026
10000	0.968	\$ -12,207.70	0.094
25000	1.314	\$ 237,725.43	0.159
50000	1.479	\$ 664,747.67	0.189
100000	1.535	\$ 1,417,116.28	0.199
170000	1.440	\$ 1,941,517.14	0.182
340000	0.780	\$ -1,911,486.14	0.056
<i>Cacao, Descarte</i>			
1000	0.193	\$ -124,199.37	-0.134
2500	0.525	\$ -91,067.99	-0.012
5000	0.922	\$ -19,999.14	0.084
10000	1.401	\$ 153,229.96	0.179
20000	1.852	\$ 542,233.96	0.264
30000	1.980	\$ 872,182.30	0.290
45000	1.767	\$ 974,643.23	0.253
65000	0.840	\$ -284,132.15	0.063

Tabla 5.6: Rentabilidad de instalaciones de pirólisis para varios tamaños de plantas acorde a los residuos seleccionados.

<i>Residuo Agrícola (t/año)</i>	<i>Índice de Rentabilidad (-)</i>	<i>Valor Presente Neto (-)</i>	<i>Tasa Interna de Retorno (-)</i>
<i>Caña de panela, Bagazo</i>			
1000	1.254	\$ 64,019.49	0.153
5000	2.331	\$ 996,877.02	0.363
10000	2.606	\$ 2,199,838.58	0.419
20000	2.775	\$ 4,632,890.78	0.455
40000	2.867	\$ 9,509,567.43	0.475
80000	2.900	\$ 19,107,128.19	0.483
160000	2.848	\$ 36,935,132.04	0.472
270000	2.675	\$ 56,334,303.46	0.435
<i>Palma de aceite, Raquis</i>			
1000	0.875	\$ -25,800.33	0.072
2500	1.529	\$ 171,410.61	0.207
5000	1.995	\$ 516,958.00	0.296
10000	2.353	\$ 1,231,878.08	0.365
20000	2.595	\$ 2,699,997.55	0.415
40000	2.736	\$ 5,653,624.16	0.445
70000	2.746	\$ 9,786,348.49	0.449
100000	2.646	\$ 13,087,370.93	0.429

Tabla 5.7: Rentabilidad de instalaciones de gasificación para varios tamaños de plantas acorde a los residuos seleccionados.

<i>Residuo Agrícola (t/año)</i>	<i>Índice de Rentabilidad (-)</i>	<i>Valor Presente Neto (-)</i>	<i>Tasa Interna de Retorno (-)</i>
<i>Plátano, vástago</i>			
1000	0.767	\$ -49,830.69	0.049
5000	1.710	\$ 396,071.71	0.237
10000	1.990	\$ 977,277.83	0.289
20000	2.160	\$ 2,141,039.02	0.321
40000	2.236	\$ 4,400,379.25	0.335
80000	2.221	\$ 8,540,677.25	0.332
160000	2.093	\$ 15,156,030.36	0.307
260000	1.900	\$ 20,208,452.52	0.270
<i>Cacao, Cacota</i>			
1000	0.339	\$ -105,081.43	-0.076
2500	0.771	\$ -46,767.00	0.049
5000	1.188	\$ 52,661.67	0.139
10000	1.548	\$ 237,174.96	0.208
25000	1.703	\$ 625,962.32	0.235
50000	1.456	\$ 752,898.17	0.187
100000	0.899	\$ -321,945.37	0.081
175000	0.563	\$ -2,385,198.44	0.019

y en consecuencia los costos de logística y de transporte aumentan, haciendo inviable algunos tamaños de plantas, lo que se evidencia en los índices de rentabilidad menores que la unidad, o en tasas internas de retorno negativas. Esto es muy importante a tener en cuenta, ya que muchos cultivos tradicionales se desarrollan mayormente en fincas tradicionales de que tienen una pequeña escala de producción y están geográficamente dispersas, y a pesar de que se ha dado un valor al residuo agrícola para estimular su venta, no es tan evidente la cooperación de los agricultores en los proyectos energéticos.

5.3.5. Conclusiones

El sistema de apoyo a la decisión espacial propuesto tiene como objetivo evaluar la viabilidad de plantas de transformación energética (digestión anaerobia, pirólisis y gasificación) como un sistema integrado para la producción de bioenergía y el tratamiento de residuos agrícolas, así como proporcionar un marco que ayudará a las partes interesadas a analizar las restricciones y los potenciales de recuperación de energía a partir de residuos de cultivos regionales. Esta herramienta de decisión espacial se construyó utilizando un enfoque completo e integrado, que estima la disponibilidad de recursos de biomasa, selecciona la materia prima adecuada en función de la salida energética y evalúa los riesgos y costos asociados. La implementación de estudios de casos destacó la complejidad de los problemas y enfoques asociados con la planificación energética. La herramienta SDSS se puede aplicar para evaluar otros recursos de biomasa, períodos de disponibilidad y requerimientos tecnológicos.

Referencias

- Al-Hamamre, Z., Saidan, M., Hararah, M., Rawajfeh, K., Alkhasawneh, H. E. and Al-Shannag, M. (2017). Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**: 295–314.
- Aui, A., Li, W. and Wright, M. M. (2019). Techno-economic and life cycle analysis of a farm-scale anaerobic digestion plant in Iowa, *Waste Management* **89**: 154–164.
- Bidart, C., Fröhling, M. and Schultmann, F. (2014). Livestock manure and crop residue for energy generation: Macro-assessment at a national scale, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **38**: 537–550.

- Buller, L. S., da Silva Romero, C. W., Lamparelli, R. A. C., Ferreira, S. F., Bortoleto, A. P., Mussatto, S. I. and Forster-Carneiro, T. (2021). A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product, *Science of The Total Environment* **765**: 142717.
- Cardoen, D., Joshi, P., Diels, L., Sarma, P. M. and Pant, D. (2015). Agriculture biomass in india: Part 1. estimation and characterization, *Resources, Conservation and Recycling* **102**: 39–48.
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals, *Energy Conversion and Management* **51**(7): 1412–1421.
- Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Bañuelos, F. and Rosas, M. (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions, *Energy Conversion and Management* **74**: 471–481.
- Demirbas, M. F., Balat, M. and Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development, *Energy Conversion and Management* **50**(7): 1746–1760.
- Do, T. X., il Lim, Y. and Yeo, H. (2014). Techno-economic analysis of biooil production process from palm empty fruit bunches, *Energy Conversion and Management* **80**: 525–534.
- Elghali, L., Clift, R., Sinclair, P., Panoutsou, C. and Bauen, A. (2007). Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems, *Energy Policy* **35**(12): 6075–6083.
- Escalante, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H., Cardona Ruiz, M. and Duarte Ortega, M. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y Universidad Industrial de Santander (UIS), Bogota.
- Fan, K.-Q., Zhang, P.-F. and Pei, Z. (2013). An assessment model for collecting and transporting cellulosic biomass, *Renewable Energy* **50**: 786–794.

- Ferrari, G., Ai, P., Marinello, F. and Pezzuolo, A. (2022). Where and how? a comprehensive review of multicriteria approaches for bioenergy plant siting, *Journal of Cleaner Production* **346**: 131238.
- Garcia-Freites, S., Röder, M. and Thornley, P. (2020). Environmental trade-offs associated with bioenergy from agri-residues in sub-tropical regions: A case study of the colombian coffee sector, *Biomass and Bioenergy* **140**: 105581.
- Ghimire, A., Gyawali, R., Lens, P. N. L. and Lohani, S. P. (2021). Chapter 11 – Technologies for removal of hydrogen sulfide (H₂S) from biogas, *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*, Academic Press, pp. 295–320.
- Gómez, A., Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Dopazo, C. and Fueyo, N. (2010). An estimation of the energy potential of agro-industrial residues in spain, *Resources, Conservation and Recycling* **54**(11): 972–984.
- Hall, G. M. and Howe, J. (2012). Energy from waste and the food processing industry, *Process Safety and Environmental Protection* **90**(3): 203–212. Special Issue on Energy from Waste.
- Irfan, M., Koj, A., Sedighi, M. and Thomas, H. (2017). Design and development of a generic spatial decision support system, based on artificial intelligence and multicriteria decision analysis, *GeoResJ* **14**: 47–58.
- Karellas, S., Boukis, I. and Kontopoulos, G. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**(4): 1273–1282.
- Kishita, Y., Nakatsuka, N. and Akamatsu, F. (2017). Scenario analysis for sustainable woody biomass energy businesses: The case study of a japanese rural community, *Journal of Cleaner Production* **142**: 1471–1485.
- Kulišić, B., Par, V. and Metzler, R. (2015). Calculation of on-farm biogas potential: A croatian case study, *Biomass and Bioenergy* **74**: 66–78.
- Kung, C.-C., Kong, F. and Choi, Y. (2015). Pyrolysis and biochar potential using crop residues and agricultural wastes in china, *Ecological Indicators* **51**: 139–145. Environmental issues in China: Monitoring, assessment and management.

- Kwok, P. and Lau, H. Y. (2019). Hotel selection using a modified topsis-based decision support algorithm, *Decision Support Systems* **120**: 95–105.
- Lauwers, J., Appels, L., Thompson, I. P., Degrève, J., Van Impe, J. F. and Dewil, R. (2013). Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations, *Progress in Energy and Combustion Science* **39**(4): 383–402.
- Leboreiro, J. and Hilaly, A. K. (2011). Biomass transportation model and optimum plant size for the production of ethanol, *Bioresource Technology* **102**(3): 2712–2723.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T. and Rintala, J. (2008). Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production, *Biomass and Bioenergy* **32**(6): 541–550.
- Luz, F. C., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Andrade, R. V., Leme, M. M. V. and del Olmo, O. A. (2015). Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in brazil, *Energy Conversion and Management* **103**: 321–337.
- Maghanaki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G. and Galogah, R. J. (2013). Potential of biogas production in iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **28**: 702–714.
- Murthy, P. S. and Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—a review, *Resources, Conservation and Recycling* **66**: 45–58.
- Naqi, A., Kuhn, J. N. and Joseph, B. (2019). Techno-economic analysis of producing liquid fuels from biomass via anaerobic digestion and thermochemical conversion, *Biomass and Bioenergy* **130**: 105395.
- Ngumah, C., Ogbulie, J., Orji, J. and Amadi, E. (2013). Potential of organic waste for biogas and biofertilizer production in nigeria, *Environmental Research, Engineering and Management* **63**.
- Nixon, J., Dey, P., Davies, P., Sagi, S. and Berry, R. (2014). Supply chain optimisation of pyrolysis plant deployment using goal programming, *Energy* **68**: 262–271.
- Nomiyama, T., Aihara, N., Chitose, A., Yamada, M. and Tojo, S. (2014). Chapter 2 - biomass as local resource, in S. Tojo and T. Hirasawa (eds), *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*, Academic Press, Boston, pp. 7–17.

- Pantaleo, A., Gennaro, B. D. and Shah, N. (2013). Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of bari (italy), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **20**: 57–70.
- Peters, J. F., Iribarren, D. and Dufour, J. (2015). Simulation and life cycle assessment of biofuel production via fast pyrolysis and hydrouprgrading, *Fuel* **139**: 441–456.
- Peters, M. and Timmerhaus, K. (2004). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5 edn, McGraw-Hill, New York.
- Puig-Arnavat, M., Hernández, J. A., Bruno, J. C. and Coronas, A. (2013). Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers, *Biomass and Bioenergy* **49**: 279–289.
- Rentizelas, A. A., Tolis, A. J. and Tatsiopoulou, I. P. (2009). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(4): 887–894.
- Sganzerla, W. G., Buller, L. S., Mussatto, S. I. and Forster-Carneiro, T. (2021). Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer’s spent grains in a biorefinery concept, *Journal of Cleaner Production* **297**: 126600.
- Srirangan, K., Akawi, L., Moo-Young, M. and Chou, C. P. (2012). Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources, *Applied Energy* **100**: 172–186. Clean Energy for Future Generations.
- Sun, Y., Liu, L., Wang, Q., Yang, X. and Tu, X. (2016). Pyrolysis products from industrial waste biomass based on a neural network model, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **120**: 94–102.
- Windeatt, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A. and Singh, S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment, *Journal of Environmental Management* **146**: 189–197.
- Woolcock, P. J. and Brown, R. C. (2013). A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas, *Biomass and Bioenergy* **52**: 54–84.

- Wright, M. M., Daugaard, D. E., Satrio, J. A. and Brown, R. C. (2010). Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels, *Fuel* **89**: S2–S10. Techno-economic Comparison of Biomass-to-Biofuels Pathways.
- Xu, F., Wang, Z.-W. and Li, Y. (2014). Predicting the methane yield of lignocellulosic biomass in mesophilic solid-state anaerobic digestion based on feedstock characteristics and process parameters, *Bioresource Technology* **173**: 168–176.
- Yang, L., Xu, F., Ge, X. and Li, Y. (2015). Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **44**: 824–834.

A

Datos y gráficos suplementarios del capítulo 2

Tabla A.1: Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el modelo RNA de digestión anaerobia en régimen mesofílico.

<i>ID</i>	<i>Min.</i>	<i>1st. Q</i>	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>3rd Q</i>	<i>Max.</i>
Cel, x_1 [%]	7.060	18.640	29.730	28.840	37.310	63.000
Cel/Lig, x_2 [-]	0.650	1.843	4.230	4.477	6.015	13.200
Cel/Hem, x_3 [-]	0.290	1.045	1.400	1.493	1.853	3.910
C/N, x_4 [-]	10.700	26.320	37.080	40.160	50.000	99.210
TS, x_5 [%]	4.820	19.000	28.910	44.970	88.840	94.110
VS/TS, x_6 [%]	0.870	1.010	3.005	3.559	4.740	19.240
RIS, x_7 [-]	0.170	0.600	1.000	1.170	2.000	3.000
YCH ₄ , y [Nm ³ /kg _{SV}]	0.019	0.166	0.249	0.241	0.322	0.450

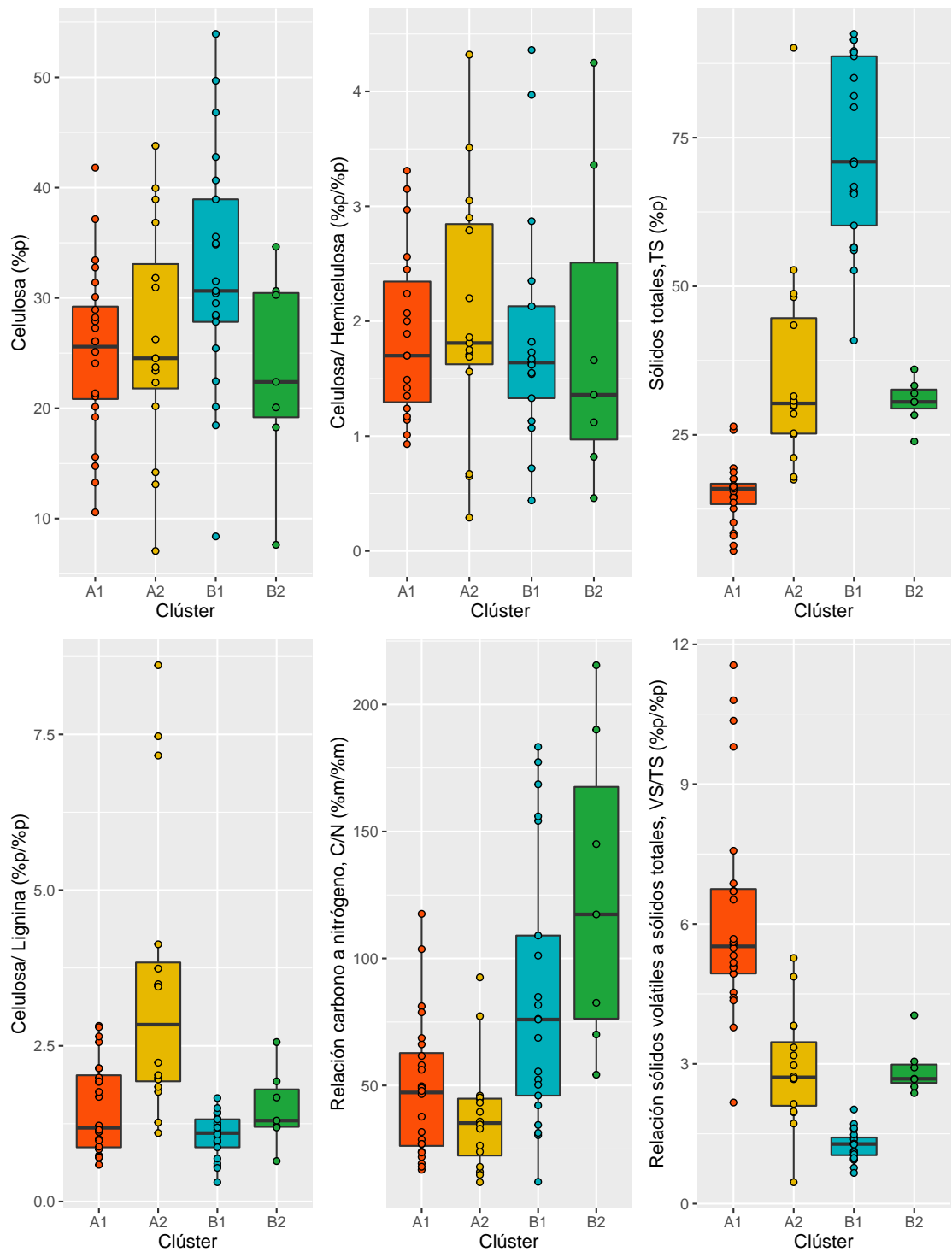


Figura A.1: Diagramas de caja y bigotes de las variables descriptoras de la digestión anaerobia en el análisis clúster

Tabla A.2: Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el modelo RNA de pirólisis en lecho fluidizado.

<i>ID</i>	<i>Min.</i>	<i>1st. Q</i>	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>3rd Q</i>	<i>Max.</i>
M, x_1 [%]	1.30	7.30	8.32	7.81	8.64	15.50
VM, x_2 [%]	69.30	76.63	78.85	79.92	81.97	98.06
FC/VM, x_3 [%]	0.001	0.17	0.21	0.20	0.24	0.37
FC/A, x_4 [%]	0.06	1.55	4.44	9.34	11.23	71.62
C, x_5 [%]	27.36	30.68	31.51	31.39	32.27	35.60
H, x_6 [%]	42.70	46.04	47.19	47.53	48.91	53.79
O/C, x_7 [%]	0.46	0.54	0.64	0.66	0.77	0.99
H/N, x_8 [%]	23.18	77.63	138.50	230.90	240.84	990.40
dP, x_{10} [μm]	75.0	337.5	700.0	857.6	1112.5	2000.0
Temperatura, x_{11} [%]	300.0	450.0	500.0	478.2	500.0	600.0
$H_s(v_{Sup}/v_t)$, x_{12} [%]	0.141	1.207	1.969	3.018	3.988	10.861
Bi-oil, y_1 [%]	22.00	44.56	49.13	49.17	53.99	71.16
Sólido, y_2 [%]	8.70	20.23	24.68	24.30	28.27	46.99
Gas, y_3 [%]	5.22	19.86	25.66	26.53	32.73	60.23

Tabla A.3: Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el modelo RNA de gasificación en lecho fluidizado.

<i>ID</i>	<i>Min.</i>	<i>1st. Q</i>	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>3rd Q</i>	<i>Max.</i>
M, x_1 [%]	5.73	7.80	8.80	9.59	11.12	25.50
VM, x_2 [%]	61.68	71.90	79.22	77.87	82.29	89.11
FC/VM, x_3 [%]	0.11	0.16	0.21	0.21	0.23	0.32
FC/A, x_4 [%]	0.65	1.40	7.16	11.19	25.79	32.40
C, x_5 [%]	28.68	30.41	32.32	31.86	32.68	37.83
H, x_6 [%]	33.76	45.50	45.75	46.05	49.20	52.83
O/C, x_8 [%]	0.49	0.61	0.64	0.67	0.76	0.84
H/N, x_7 [%]	17.32	40.17	102.58	152.63	152.50	669.29
T, x_9 [%]	600.0	750.0	787.0	784.6	812.0	1050.0
dP, x_{10} [μm]	150.0	920.0	2195.0	4035.0	7560.0	12430.0
ER, x_{11} [%]	0.00	0.20	0.25	0.25	0.30	0.49
SB, x_{12} [%]	0.00	0.00	0.02	0.39	0.60	1.70
SGas, y_1 [%]	0.77	1.12	1.55	1.65	2.10	3.10
CO, y_2 [%]	11.25	27.50	34.20	32.41	38.62	48.28
CO ₂ , y_3 [%]	12.87	27.56	34.00	34.22	40.76	68.04
CH ₄ , y_4 [%]	1.74	6.29	8.00	8.45	10.50	26.53
H ₂ , y_5 [%]	0.97	13.27	26.11	24.91	34.31	53.08

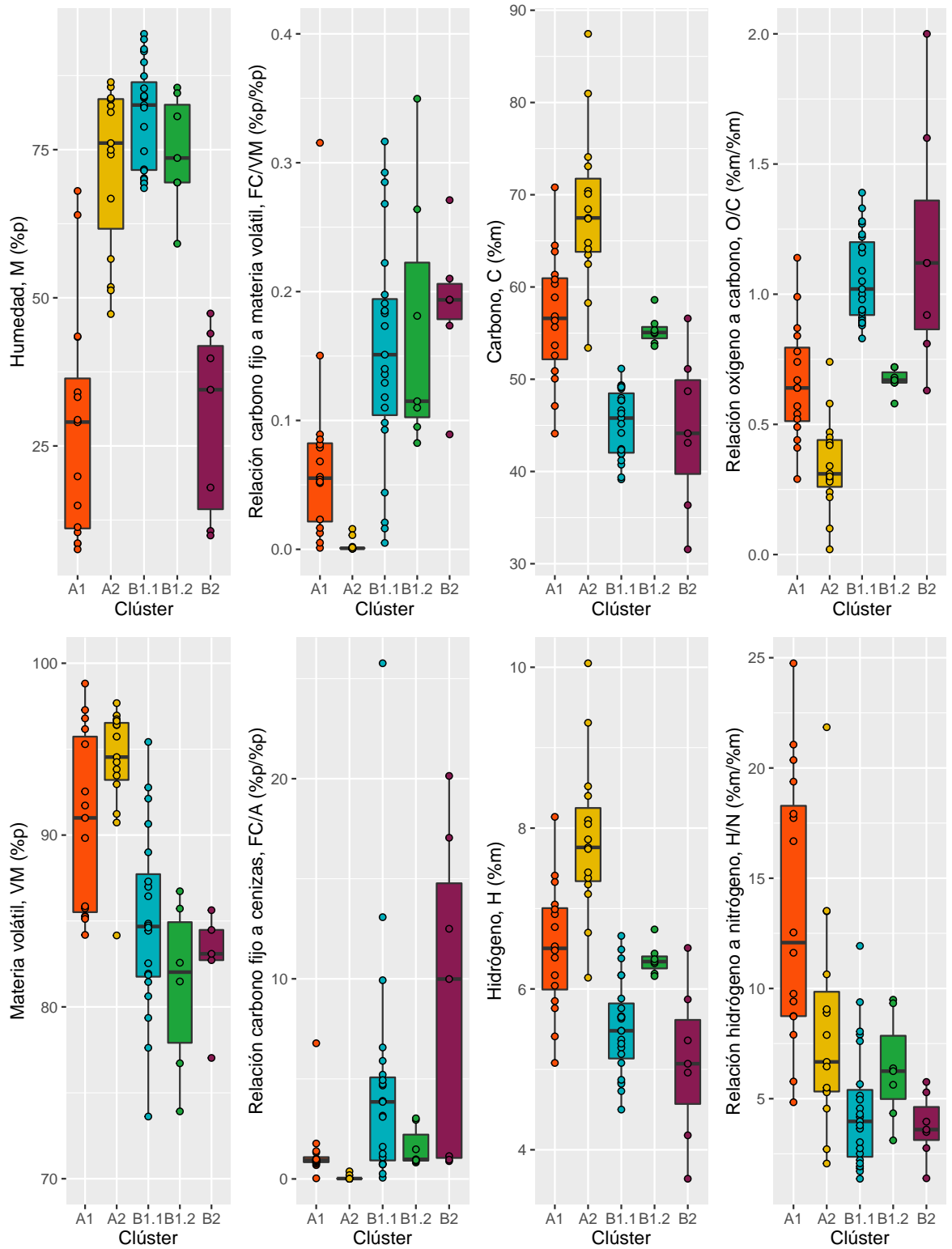


Figura A.2: Diagramas de caja y bigotes de las variables descriptoras de las tecnologías de transformación termoquímica en el análisis clúster

B

Datos y gráficos suplementarios del capítulo 3

C

Cartografía I

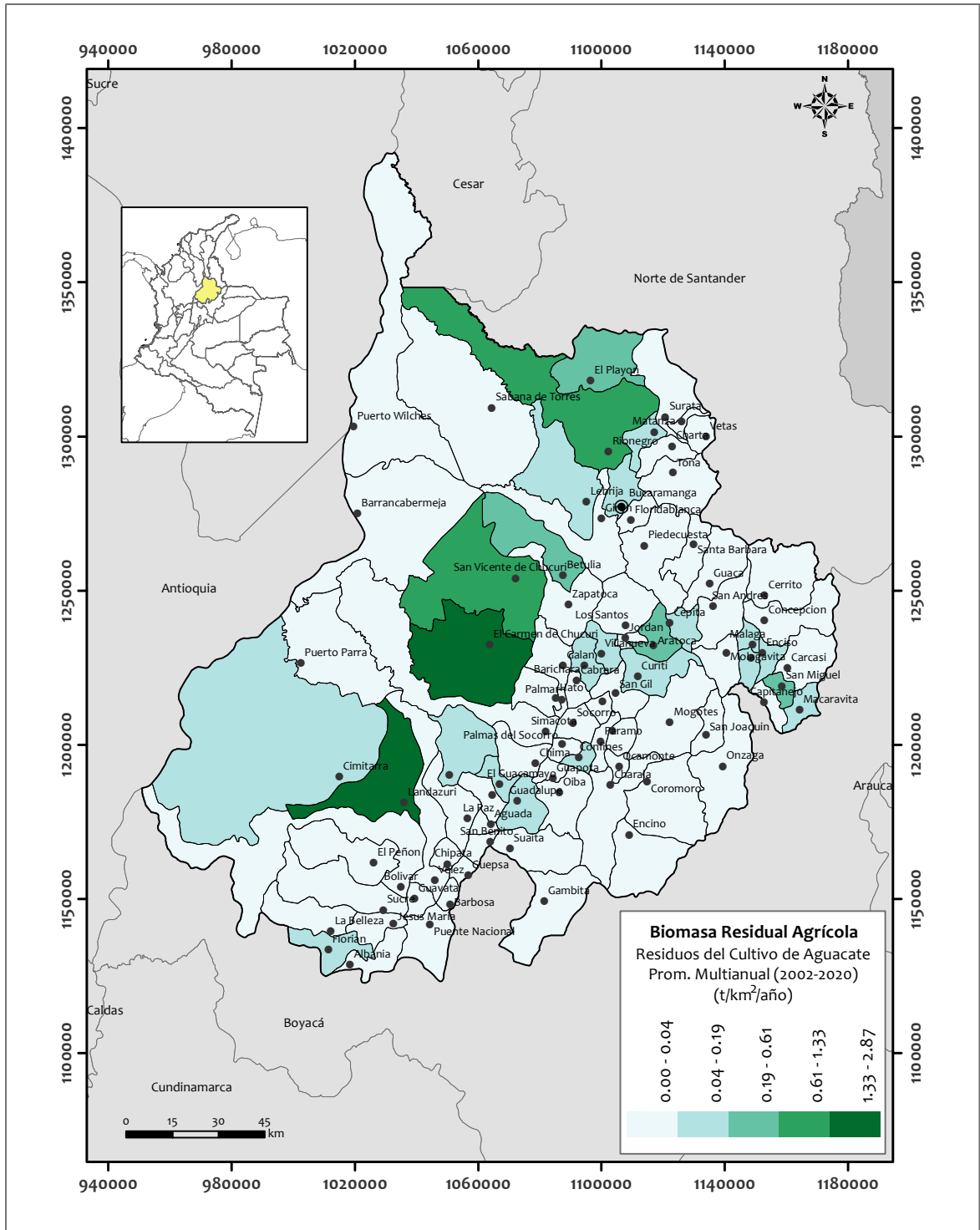


Figura C.1: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Aguacate en Santander

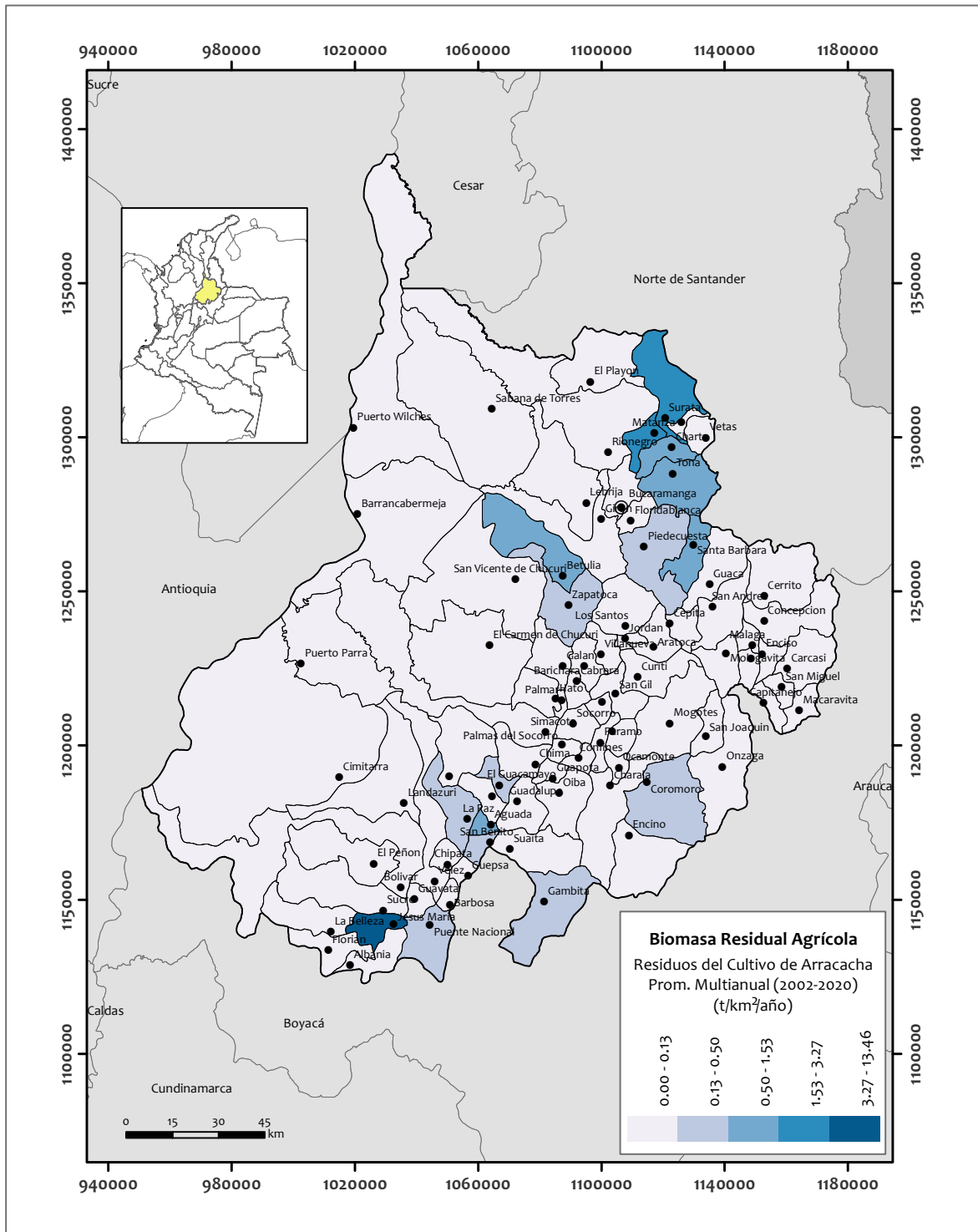


Figura C.2: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Arracacha en Santander

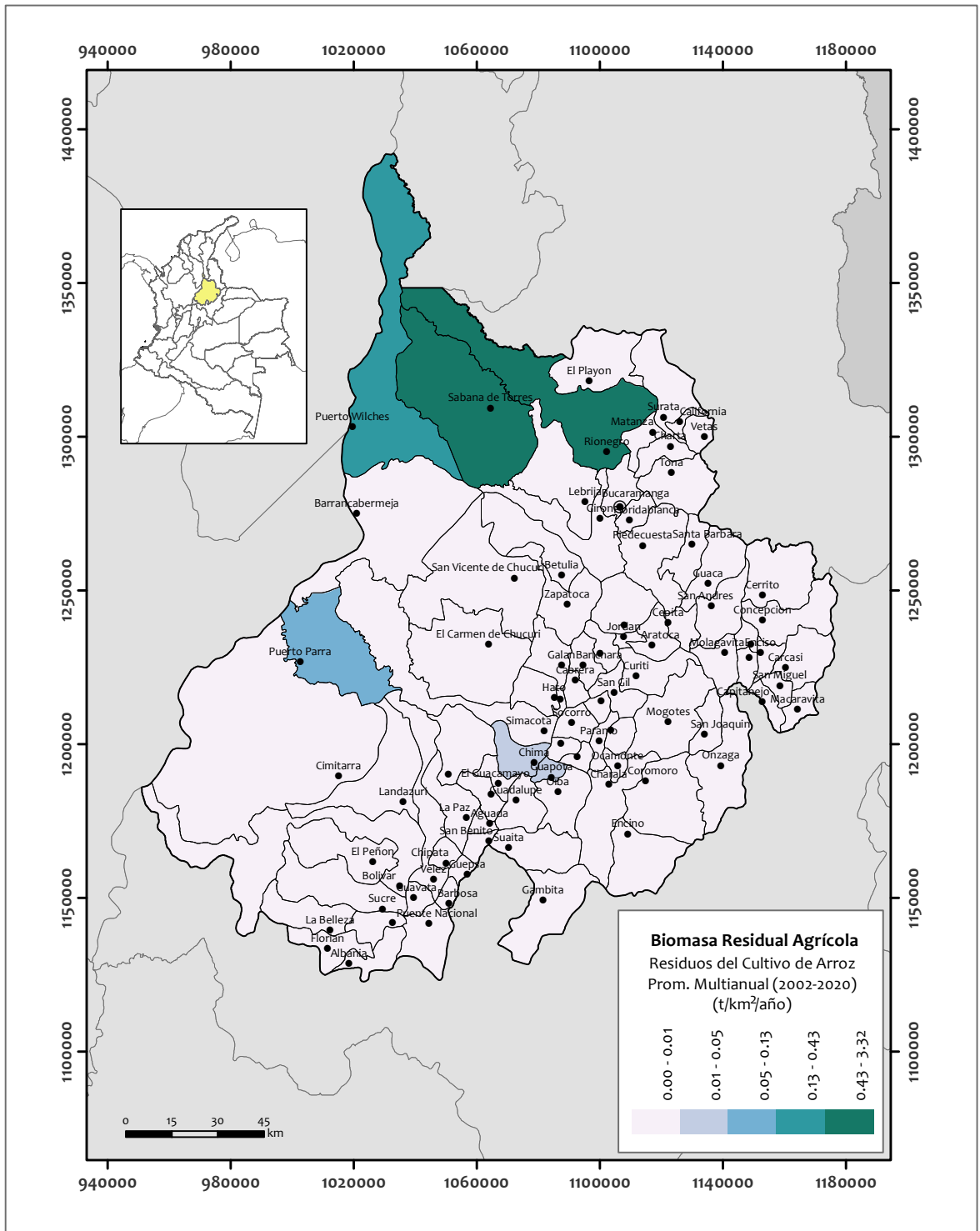


Figura C.3: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Arroz en Santander

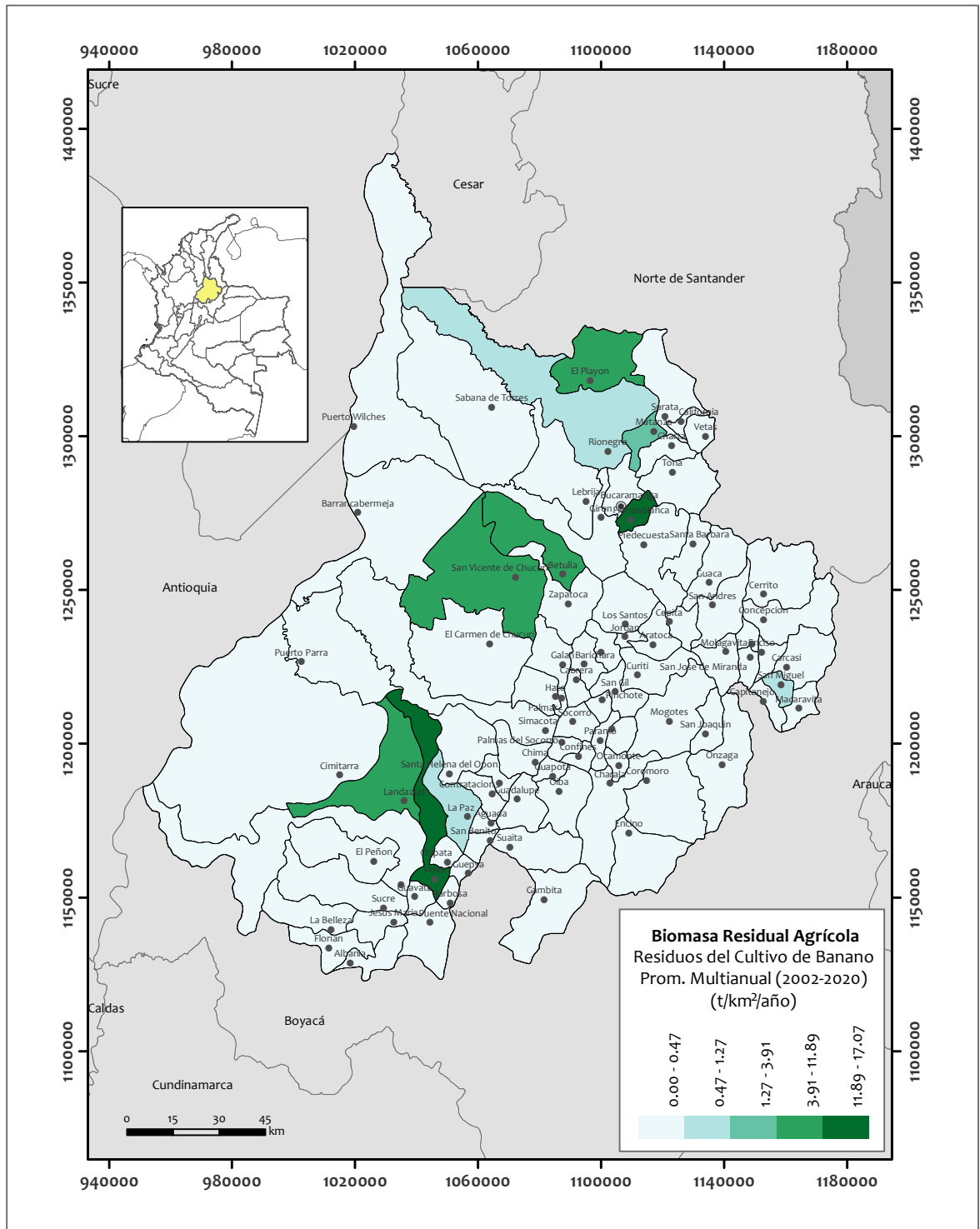


Figura C.4: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Banano en Santander

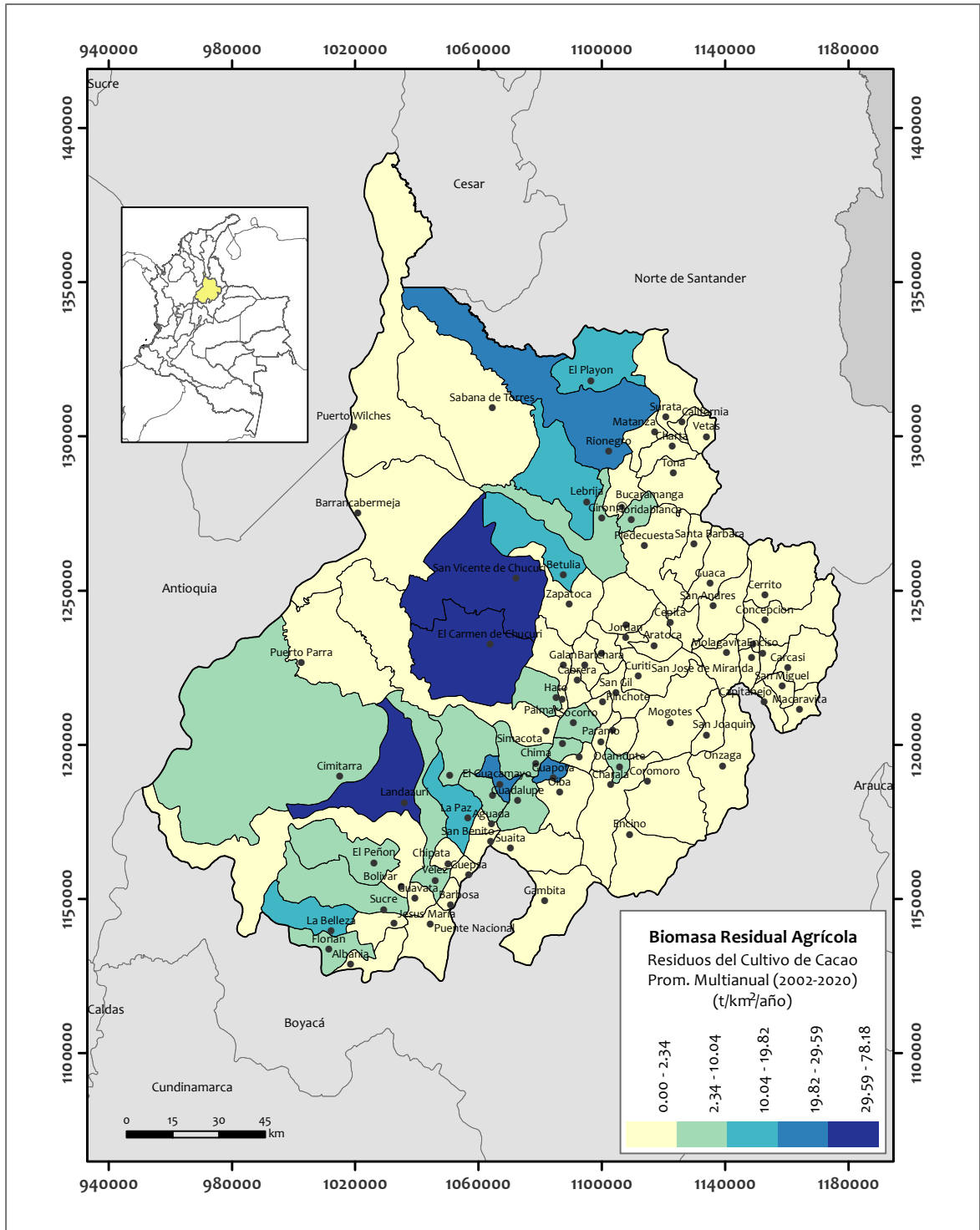


Figura C.5: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Cacao en Santander

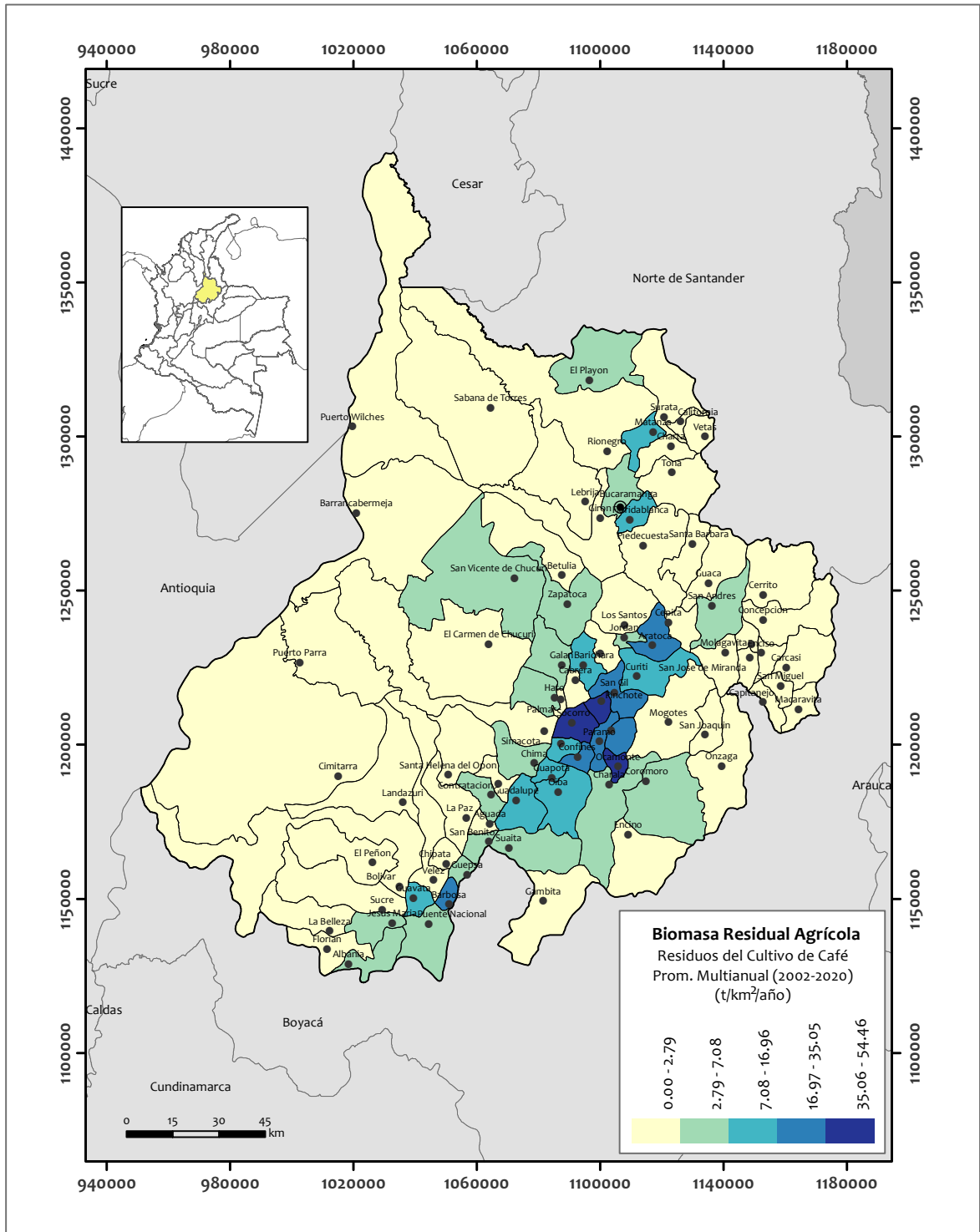


Figura C.6: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Café en Santander

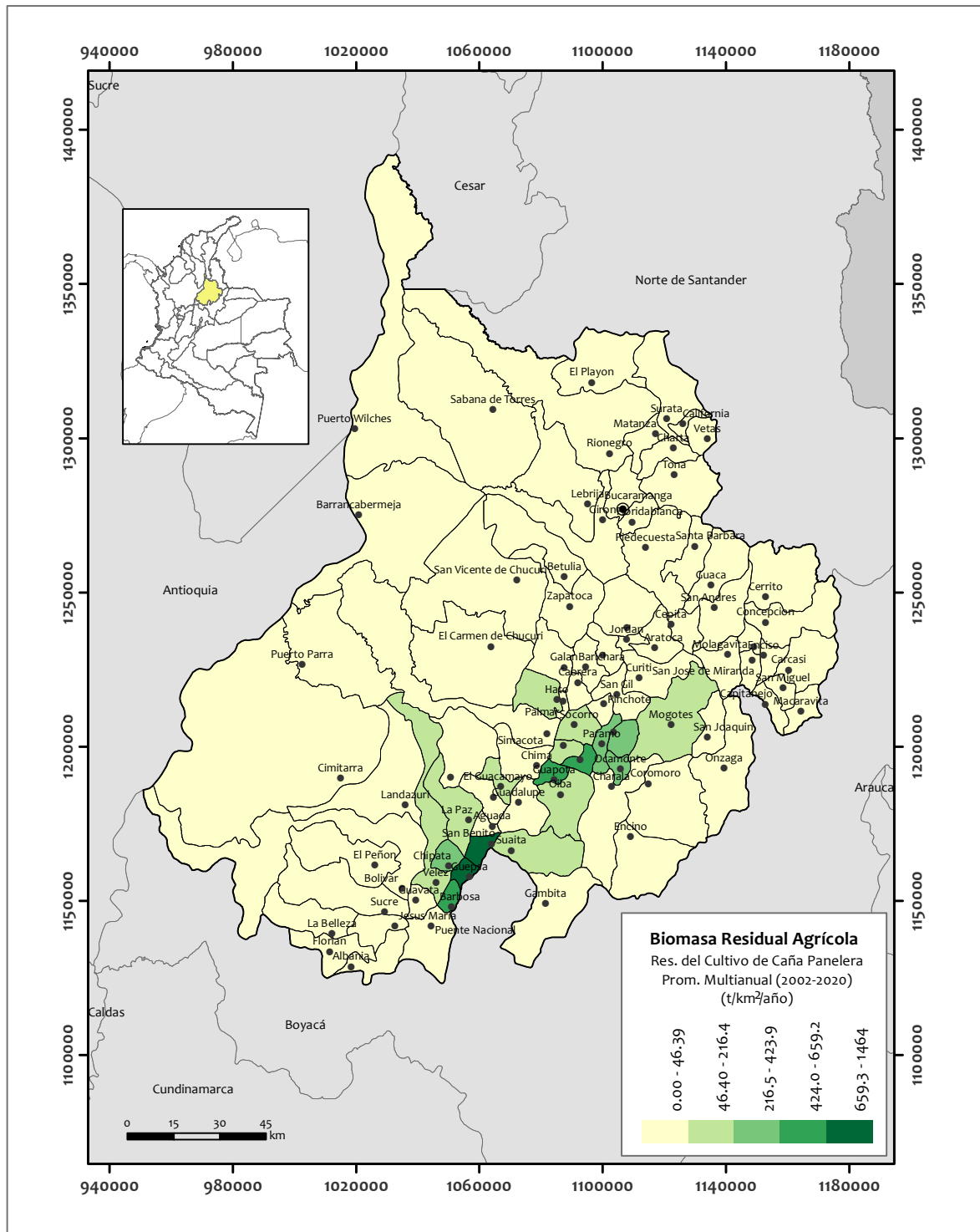


Figura C.7: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Caña Panelera en Santander

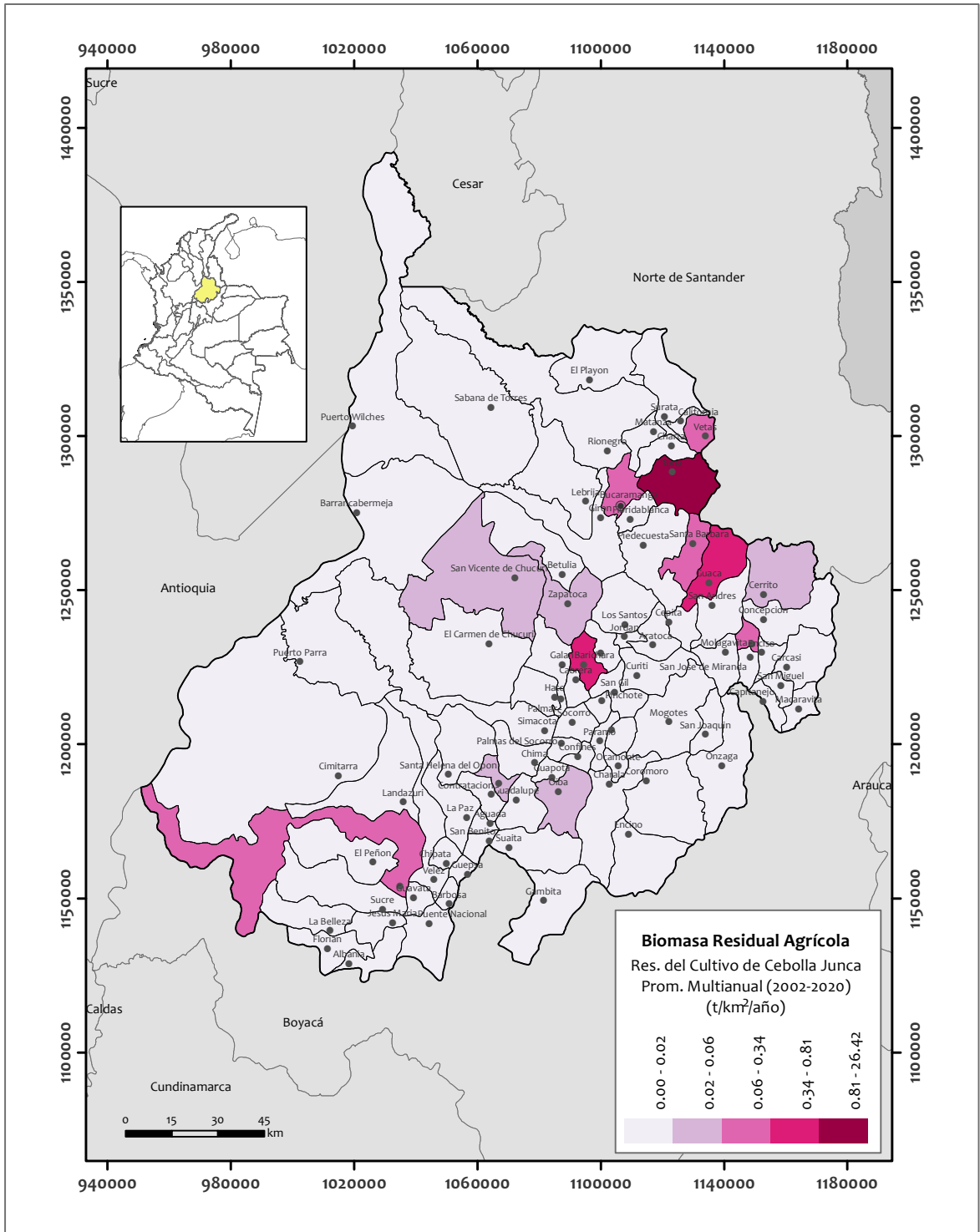


Figura C.8: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Cebolla Junca en Santander

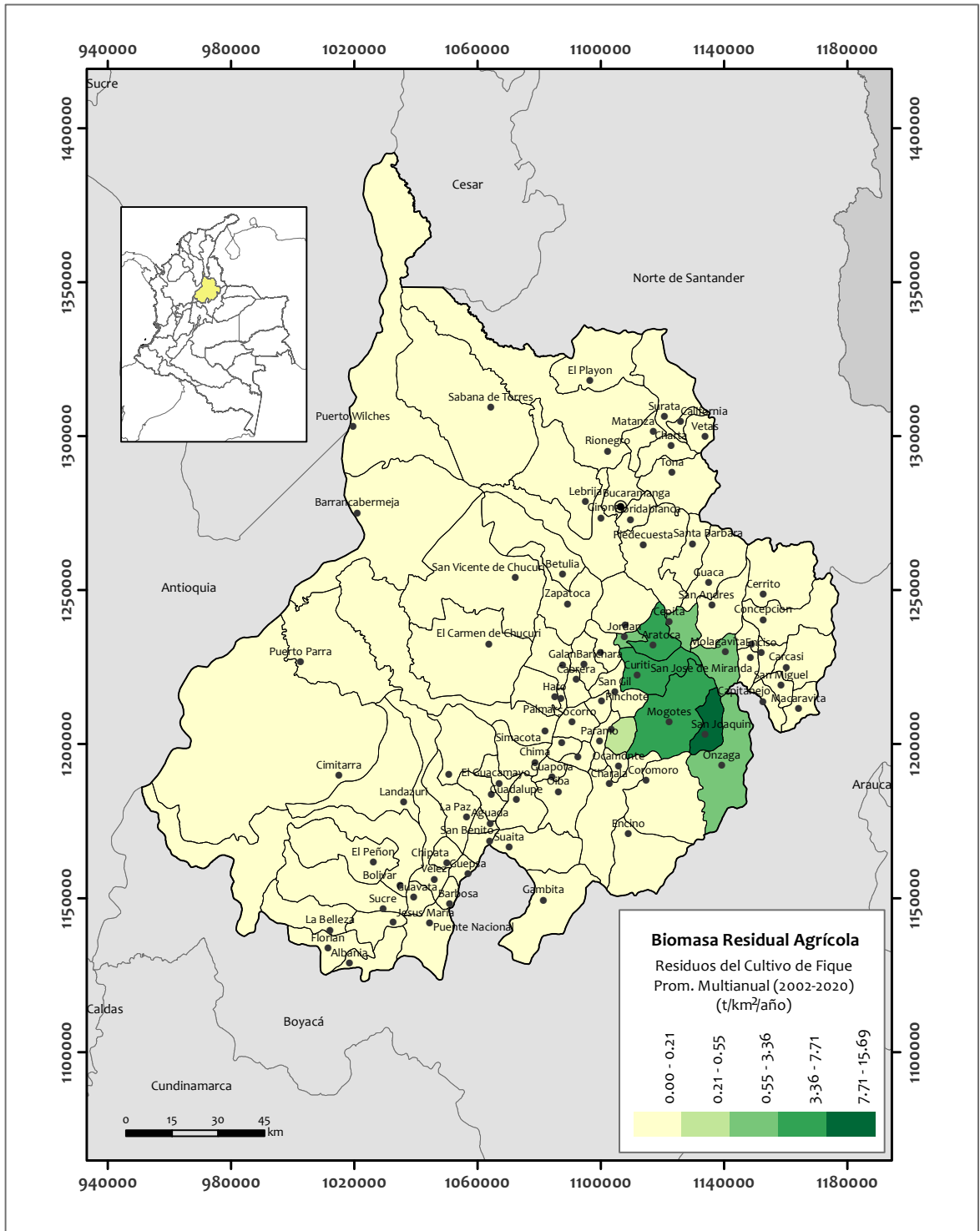


Figura C.9: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Figue en Santander

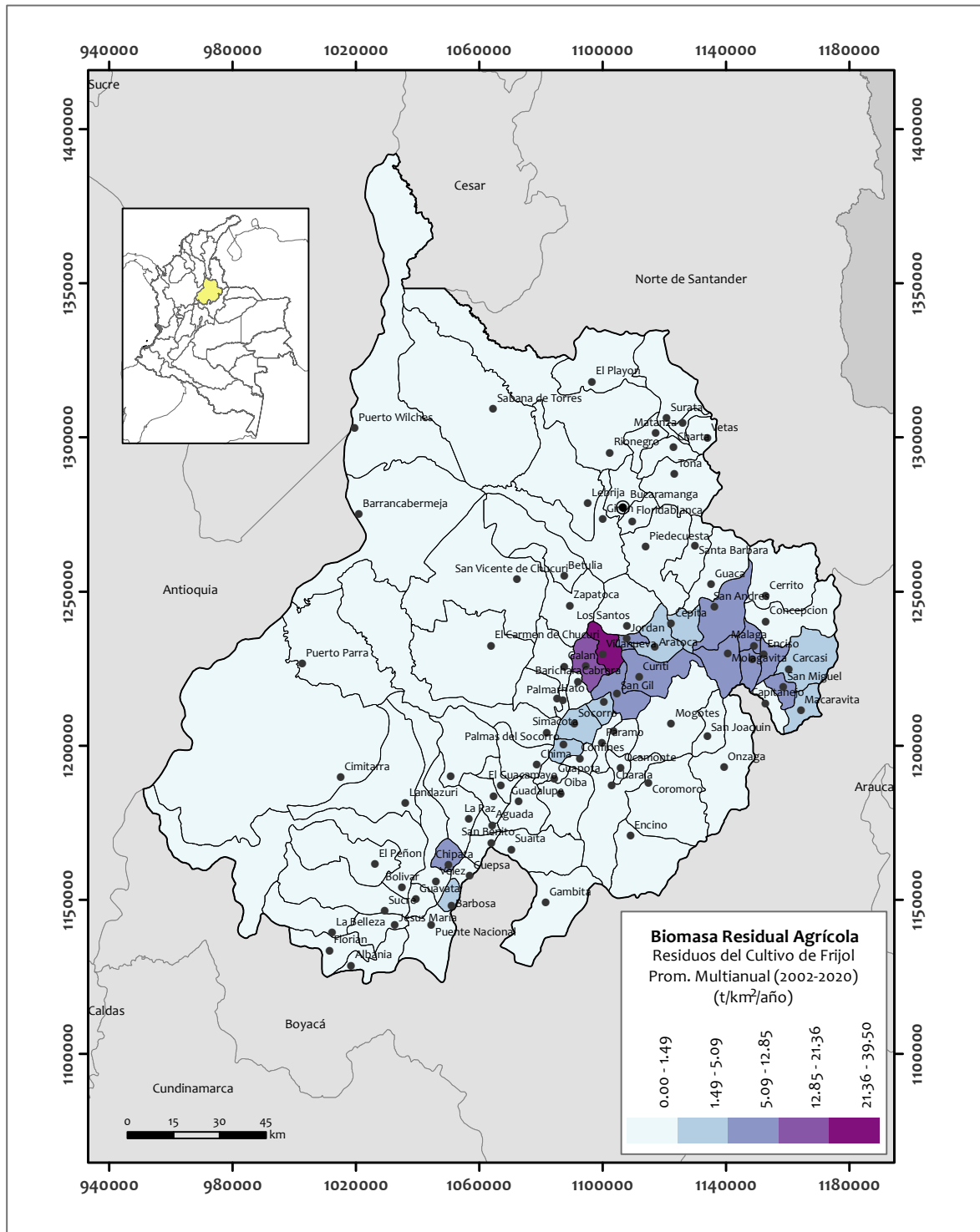


Figura C.10: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Frijol en Santander

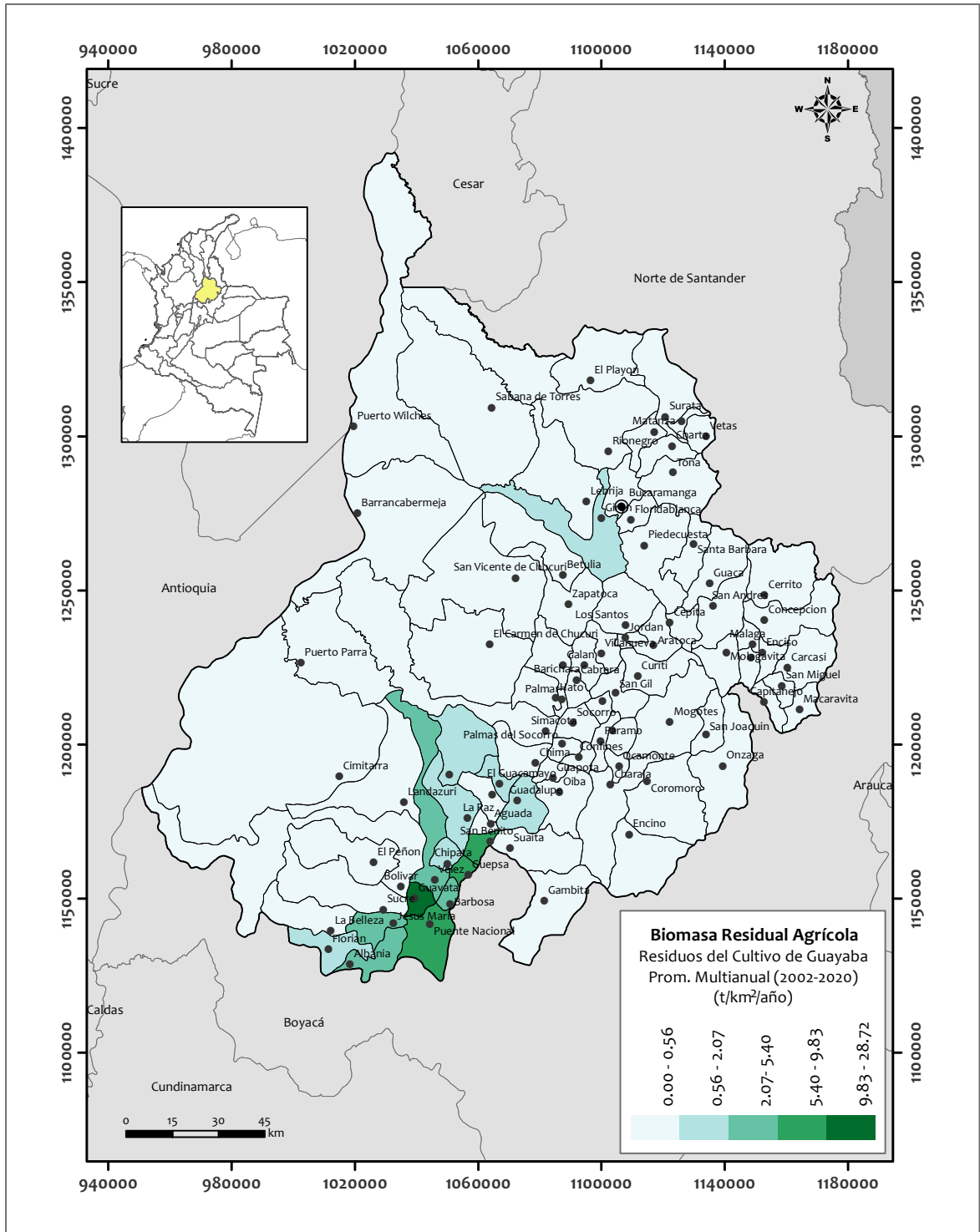


Figura C.11: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Guayaba en Santander

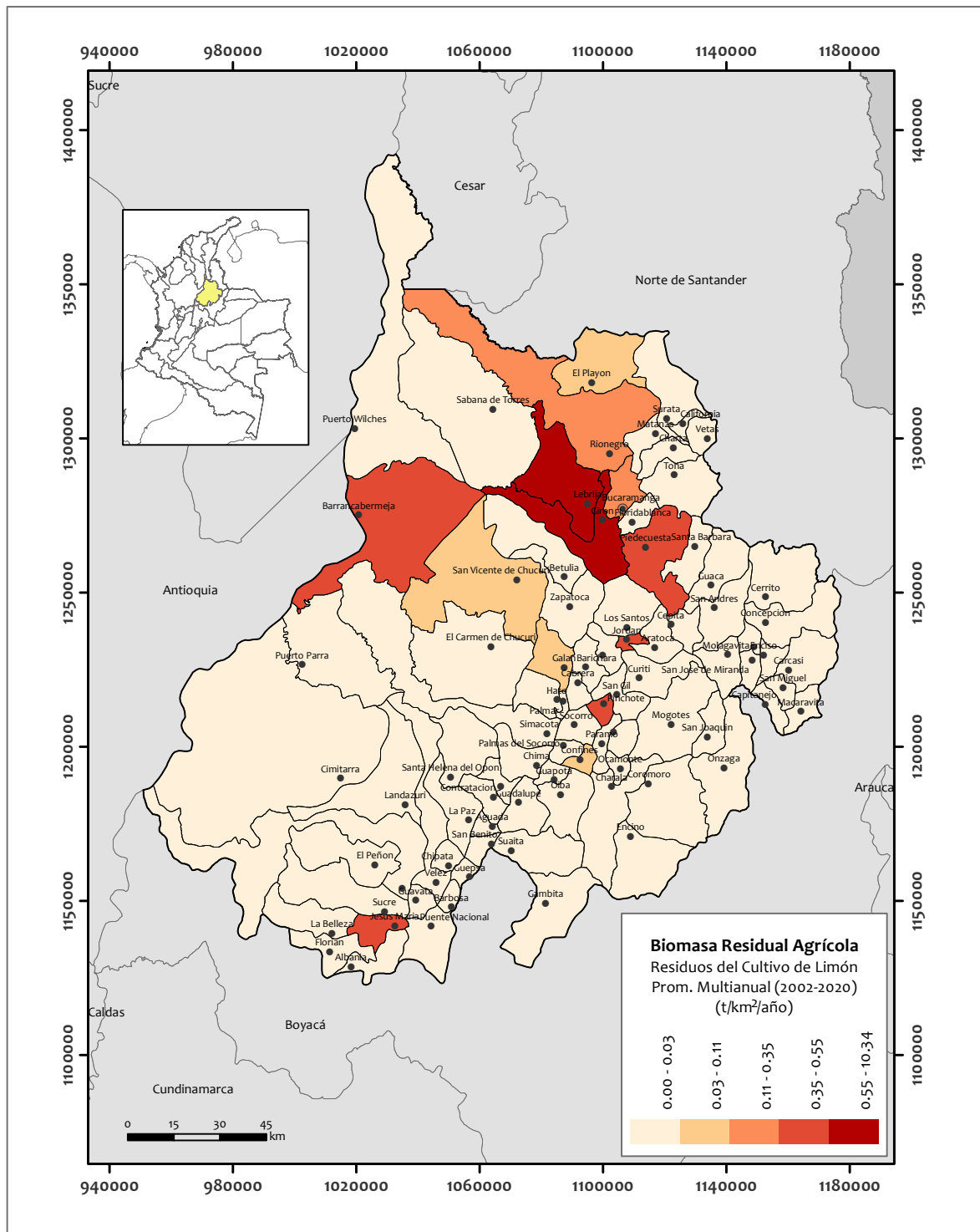


Figura C.12: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Limón en Santander

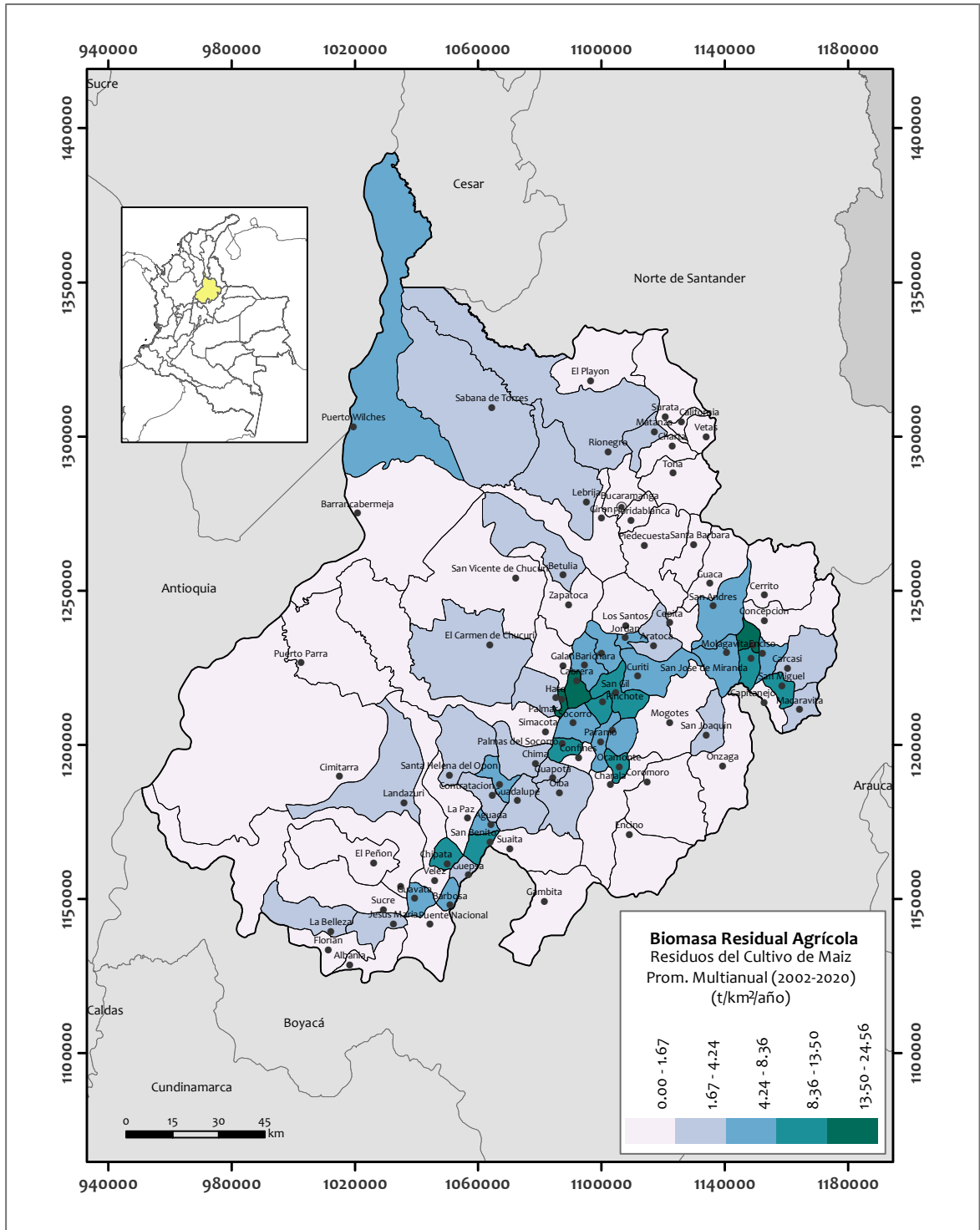


Figura C.13: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Maíz en Santander

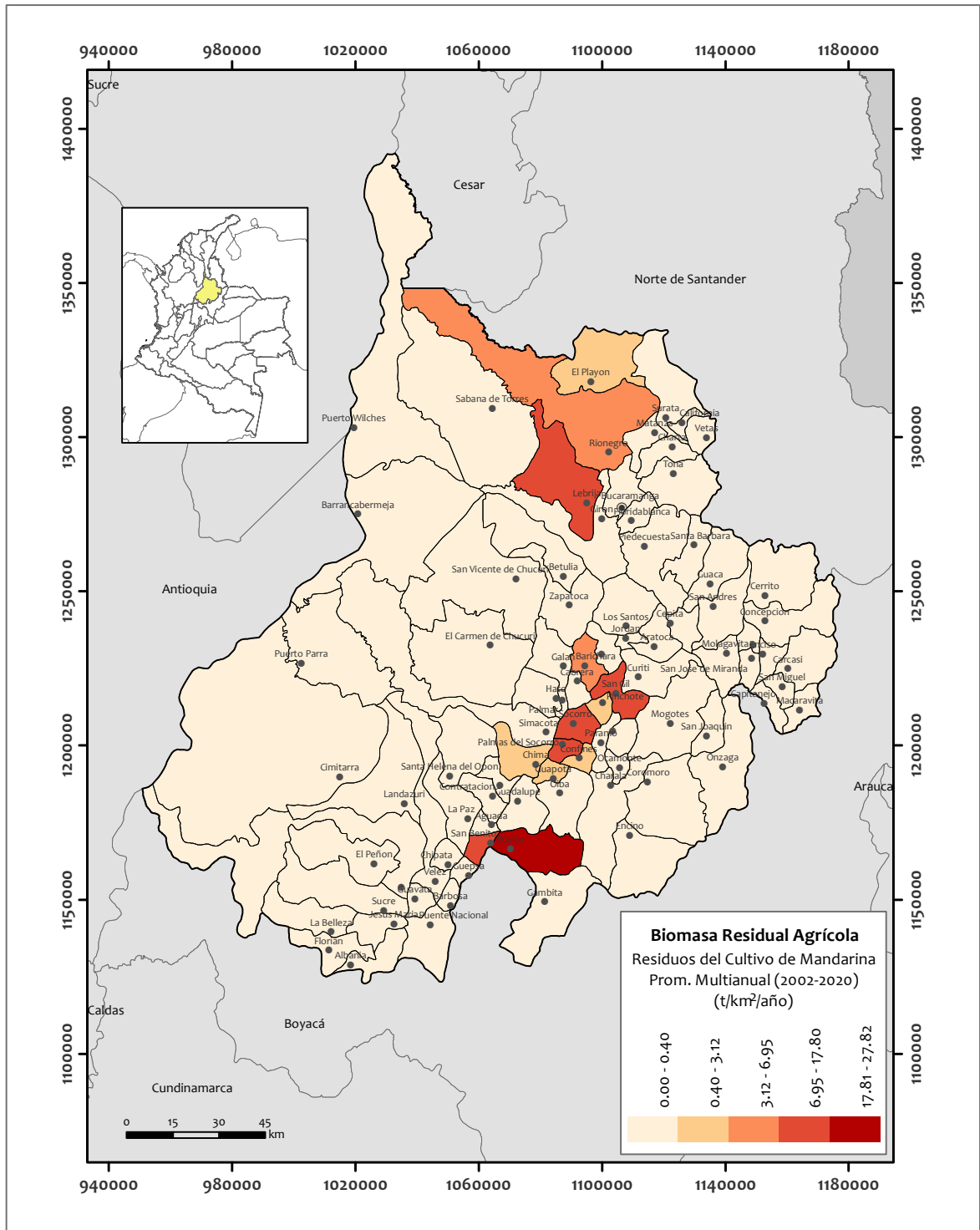


Figura C.14: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Mandarina en Santander

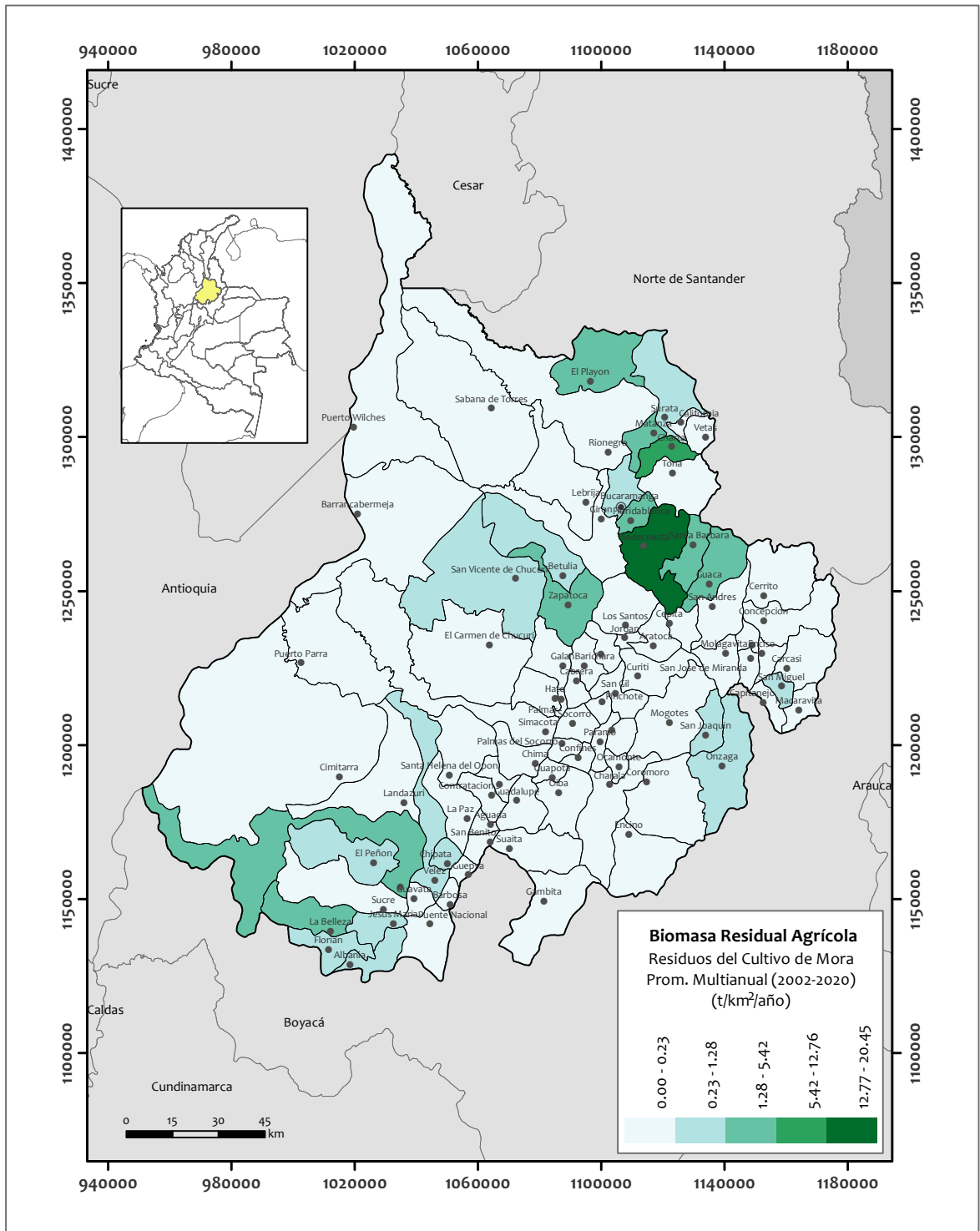


Figura C.15: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Mora en Santander

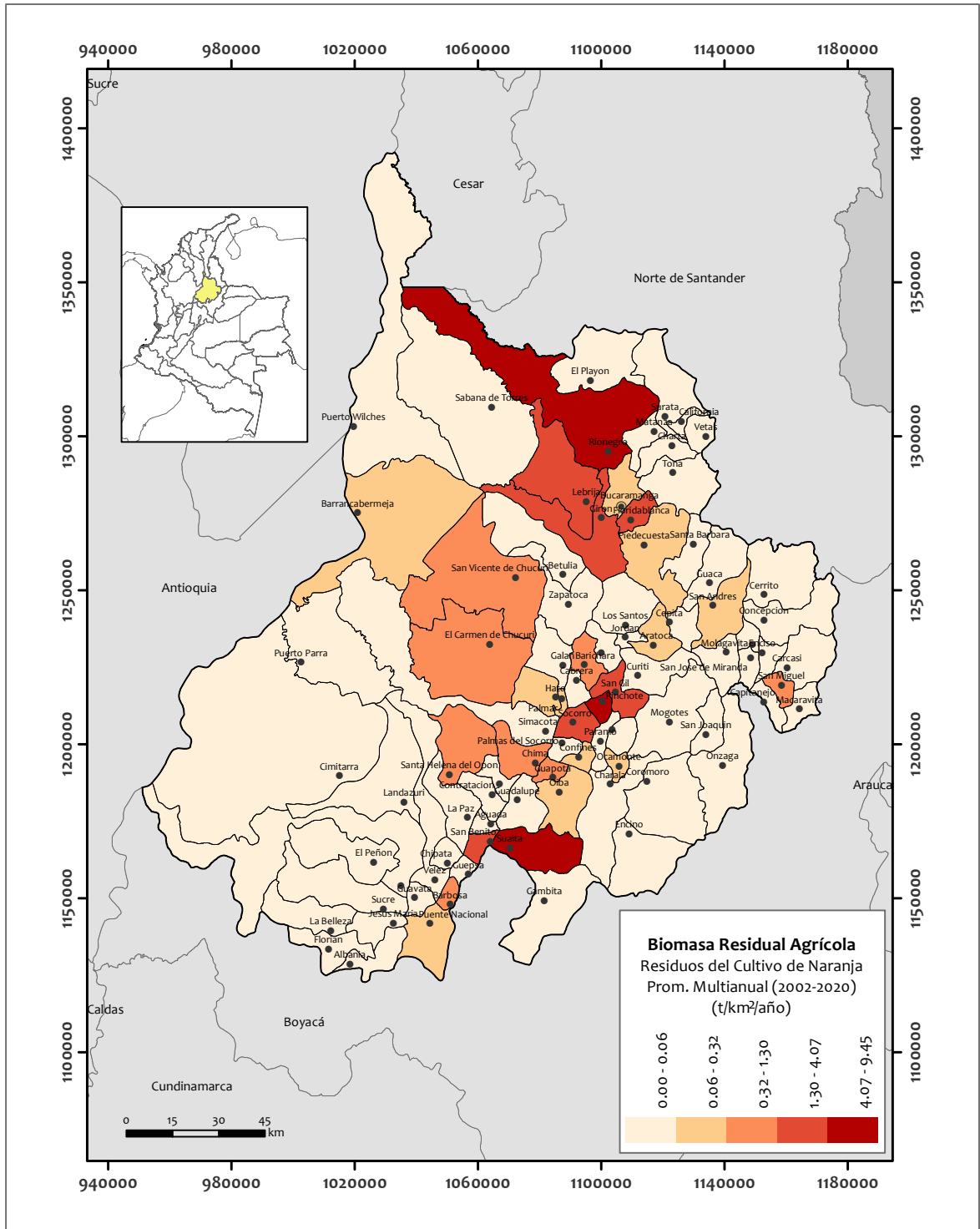


Figura C.16: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Naranja en Santander

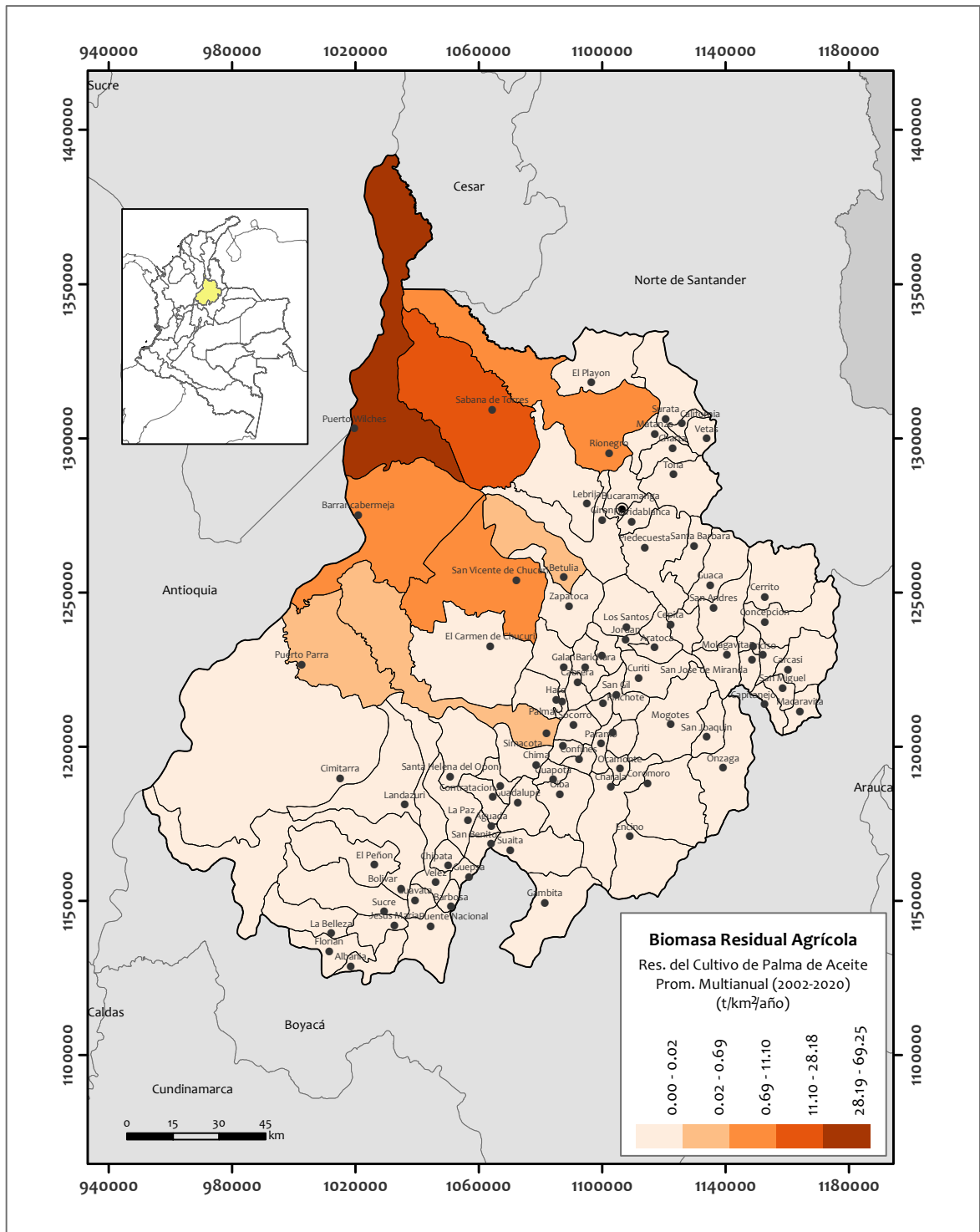


Figura C.17: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Palma de Aceite en Santander

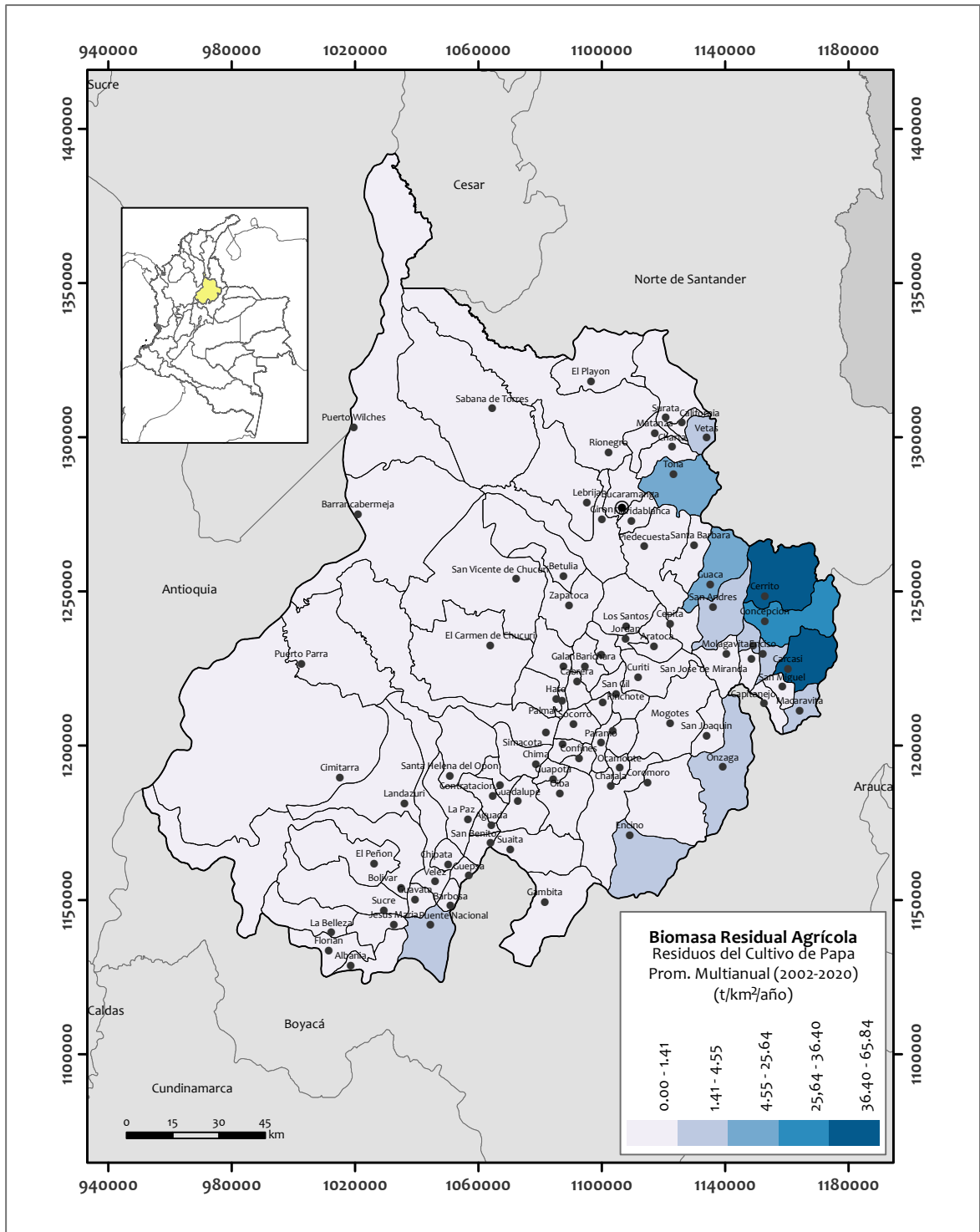


Figura C.18: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Papa en Santander

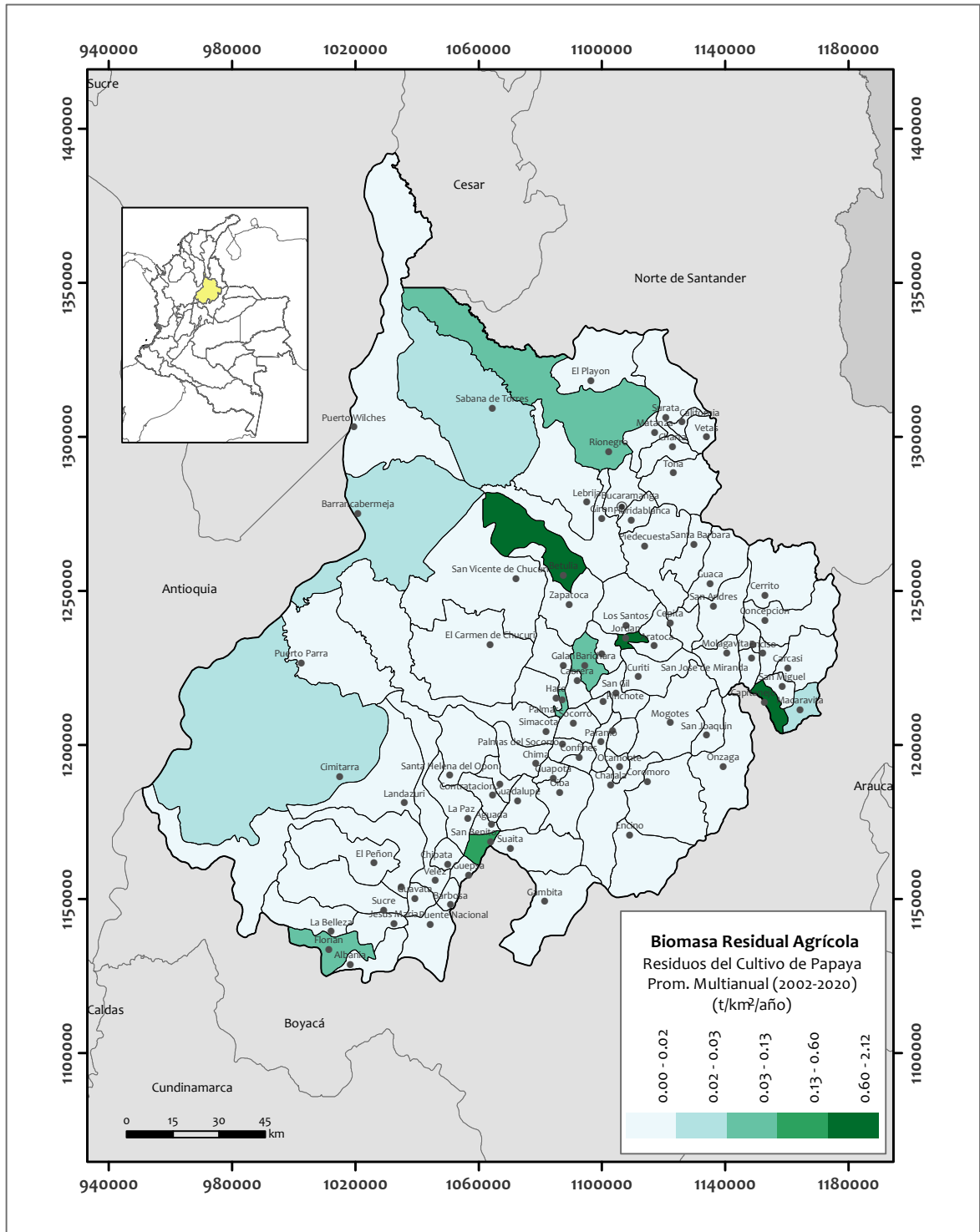


Figura C.19: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Papaya en Santander

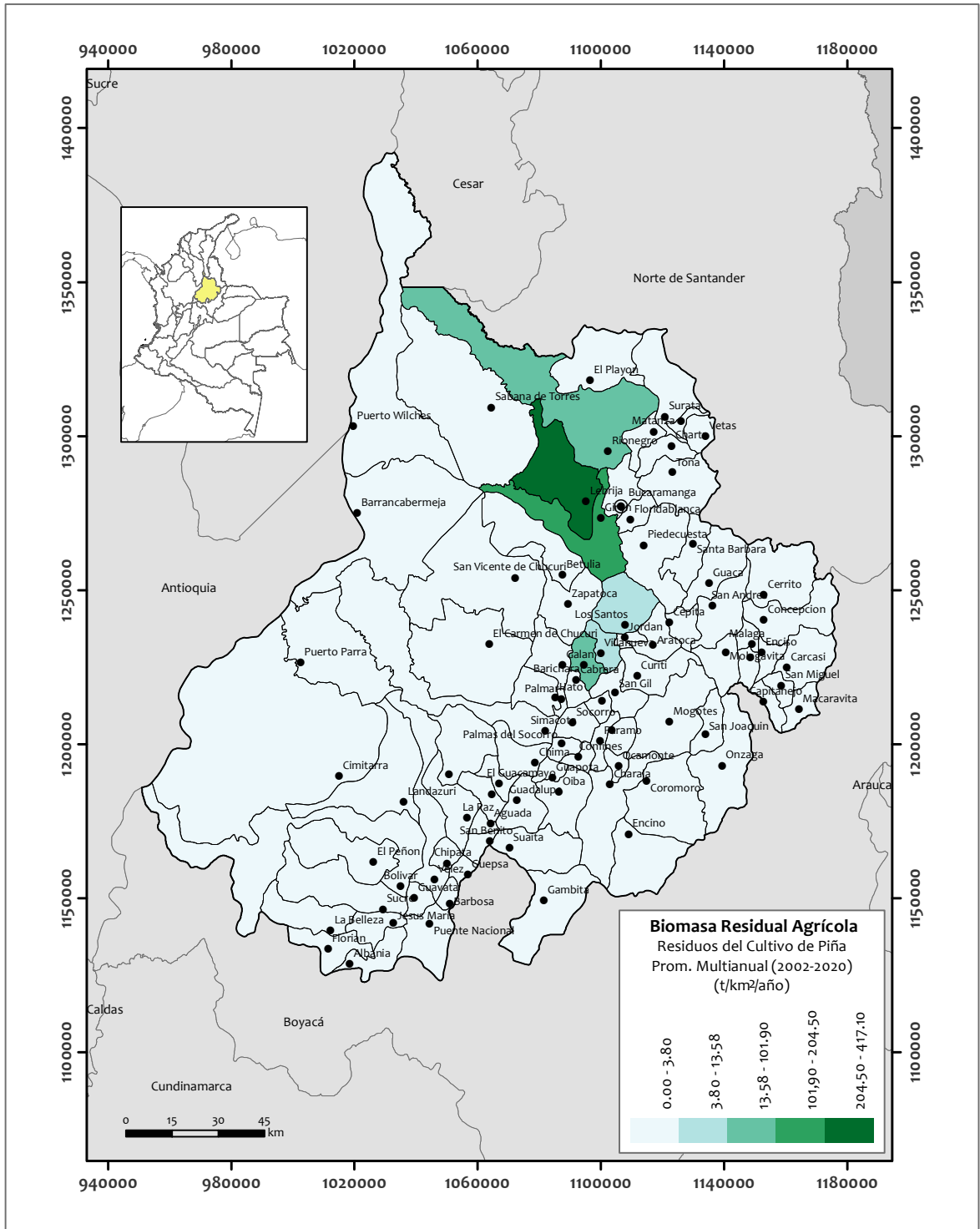


Figura C.20: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Piña en Santander

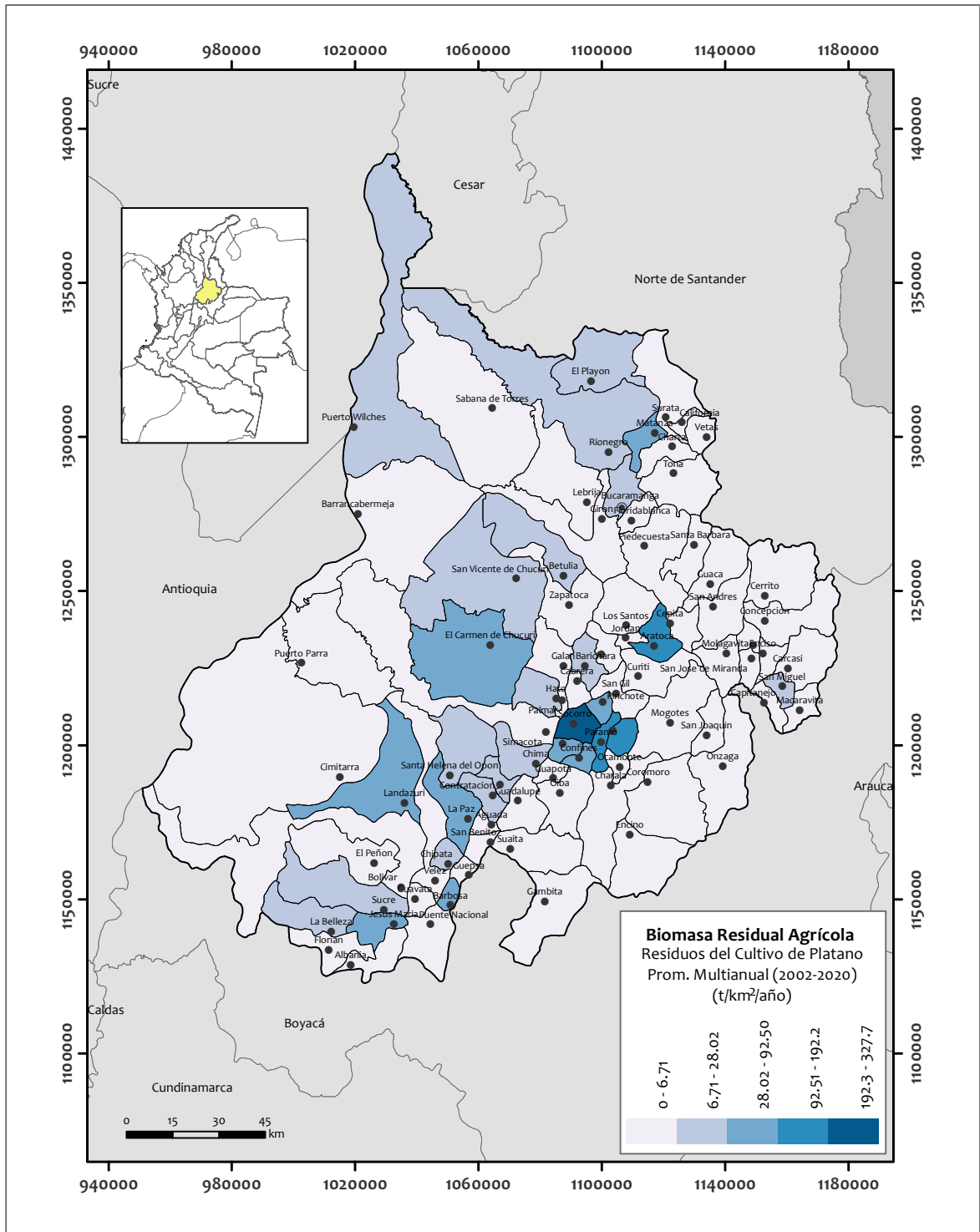


Figura C.21: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Plátano en Santander

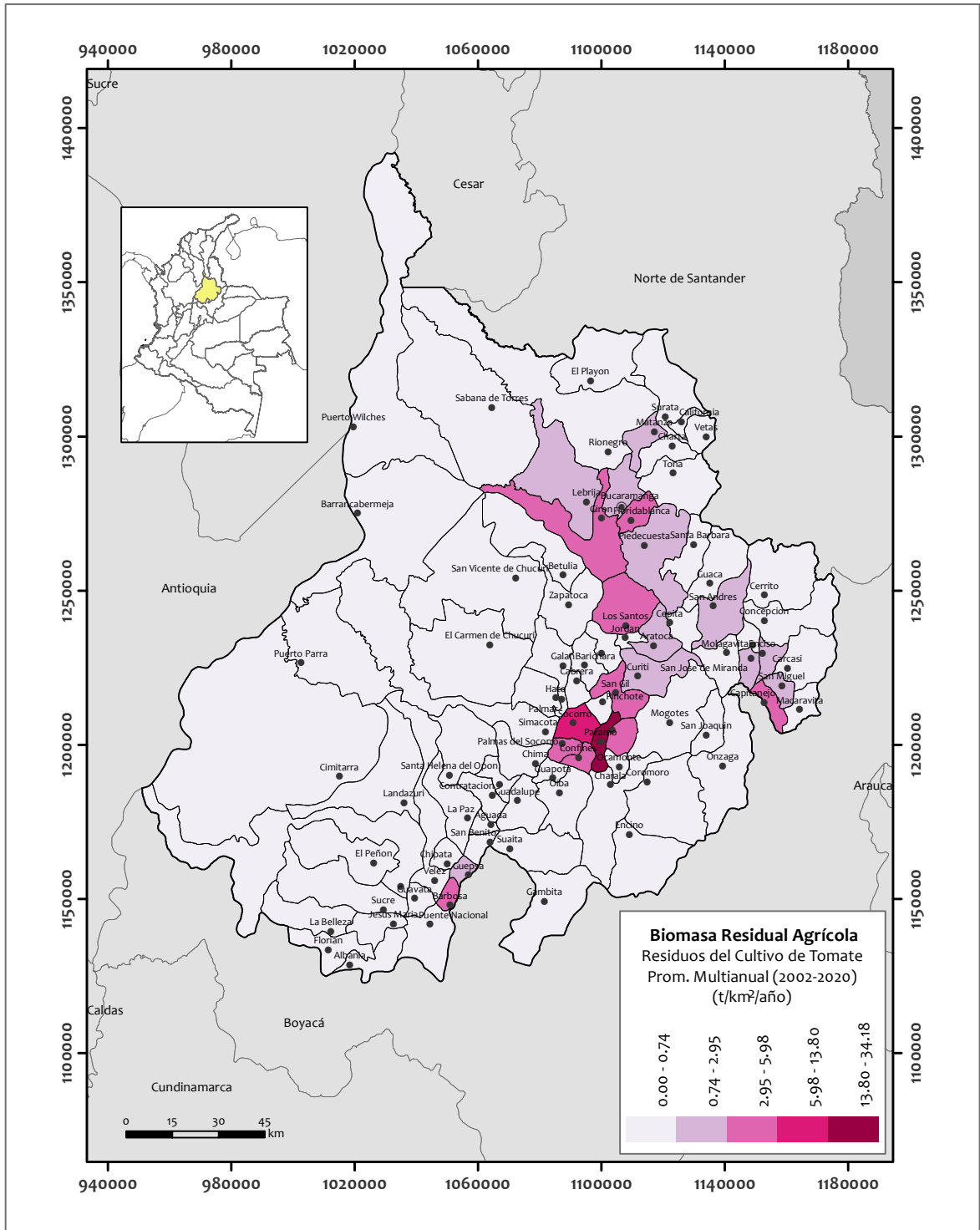


Figura C.22: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Tomate en Santander

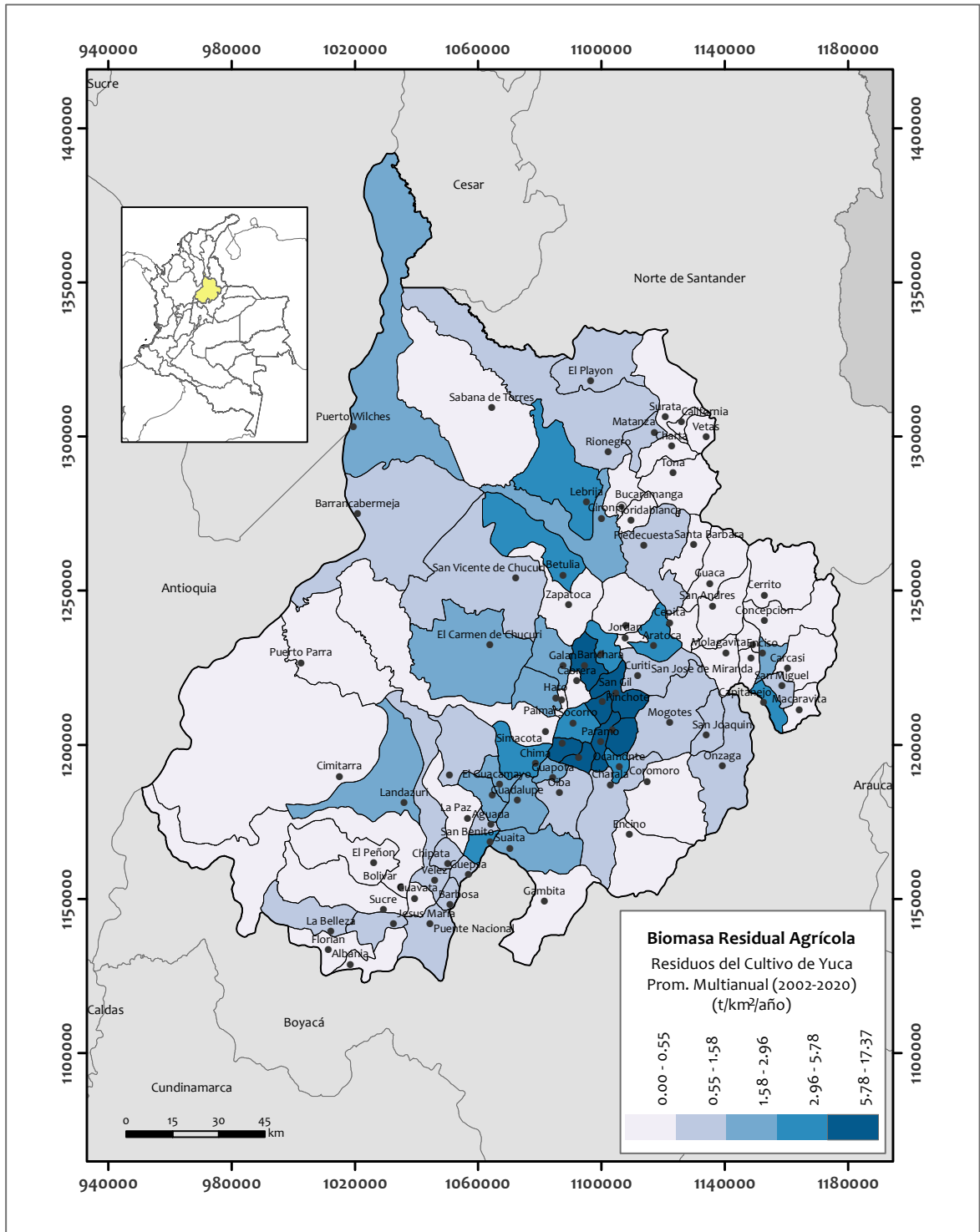


Figura C.23: Mapa de la biomasa agrícola del cultivo de Yuca en Santander

D

Cartografía II

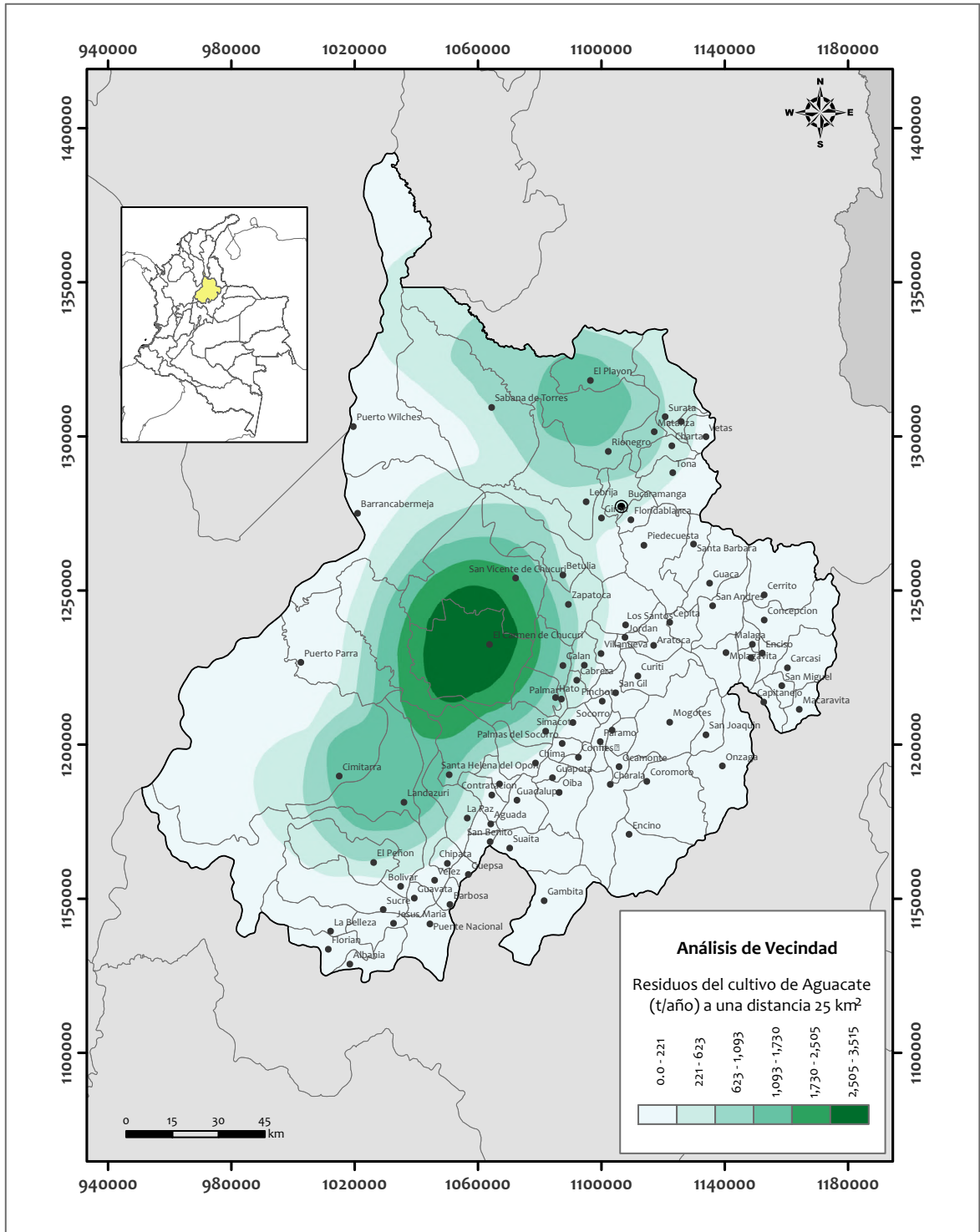


Figura D.1: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Aguacate en Santander

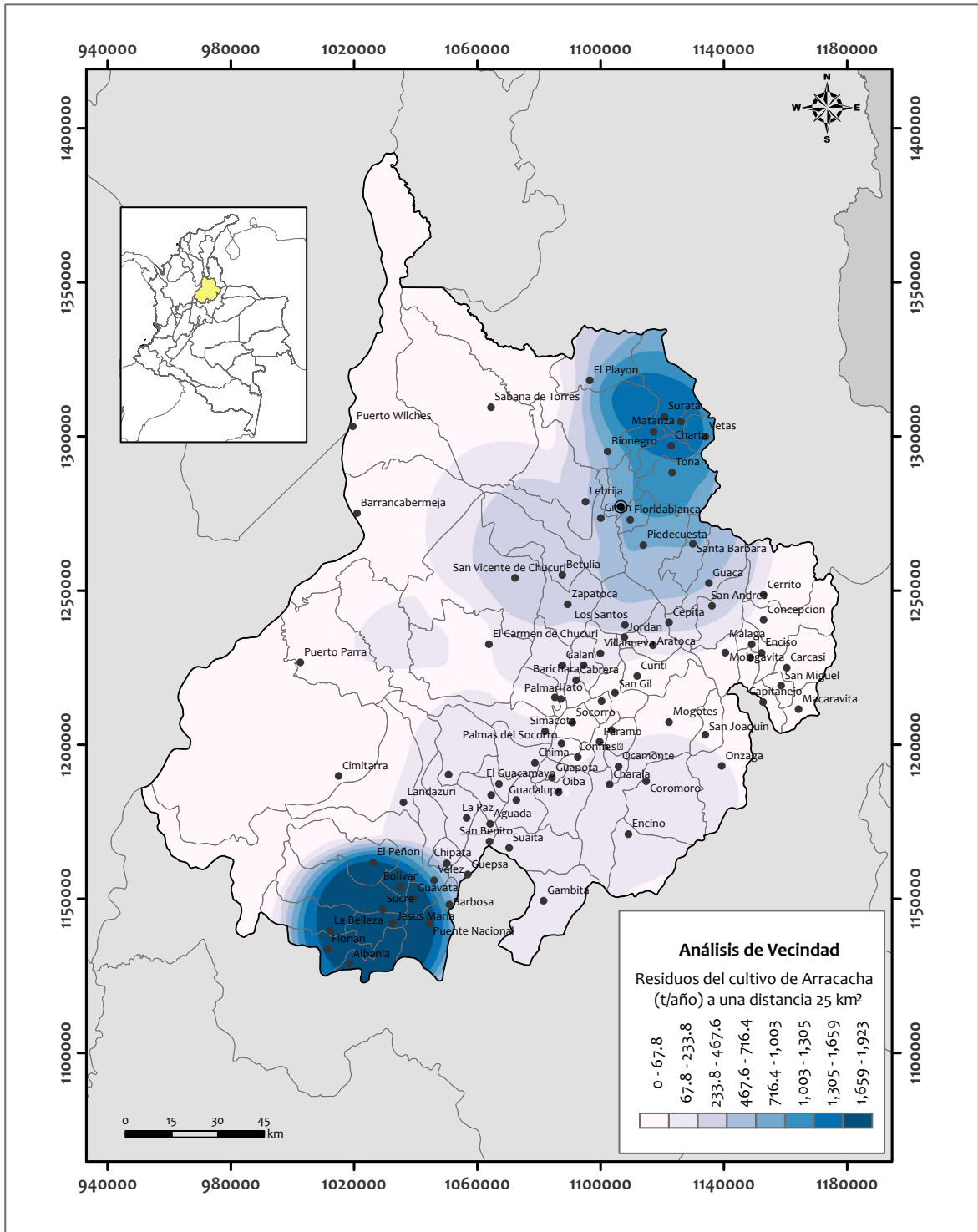


Figura D.2: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Arracacha en Santander

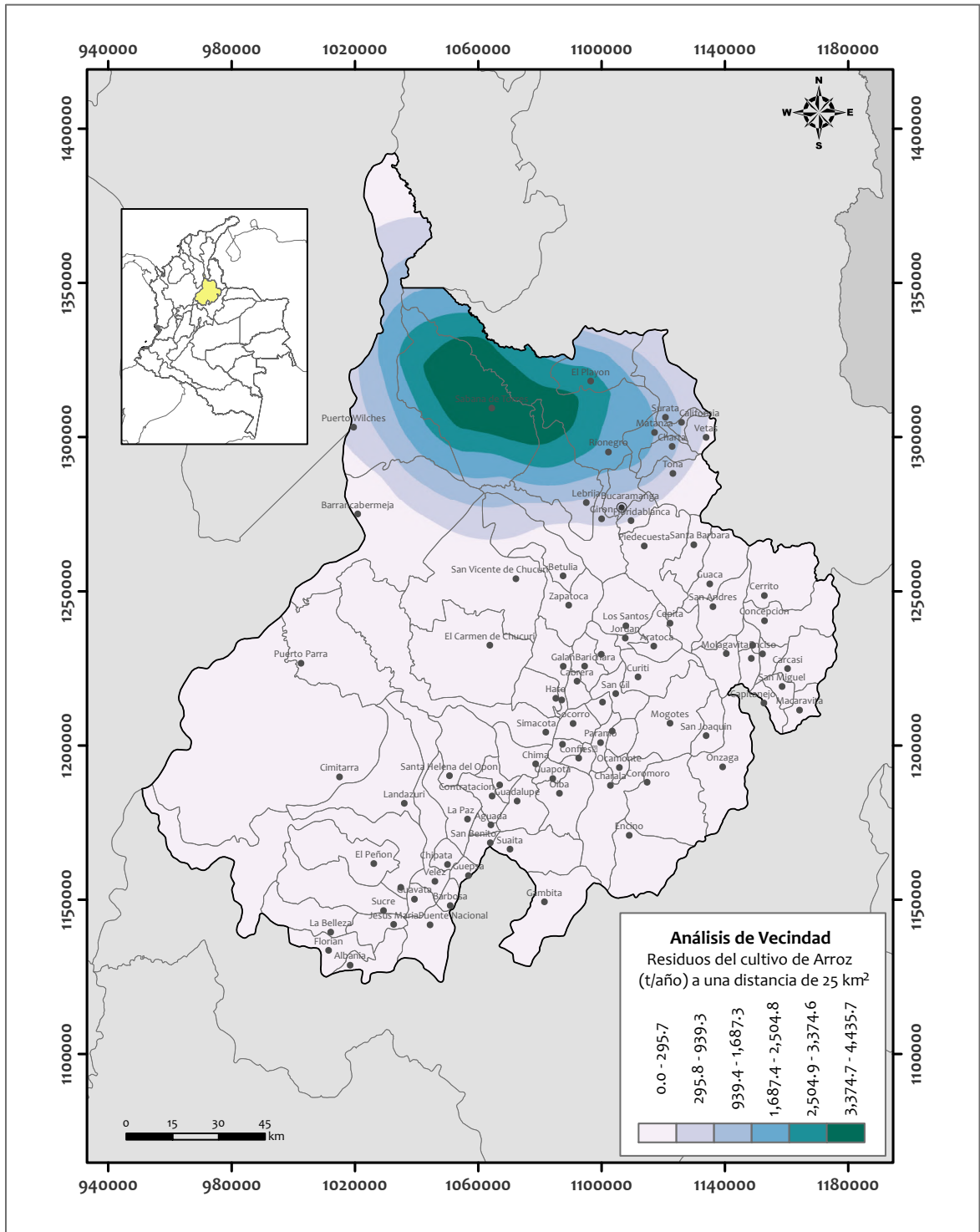


Figura D.3: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Arroz en Santander

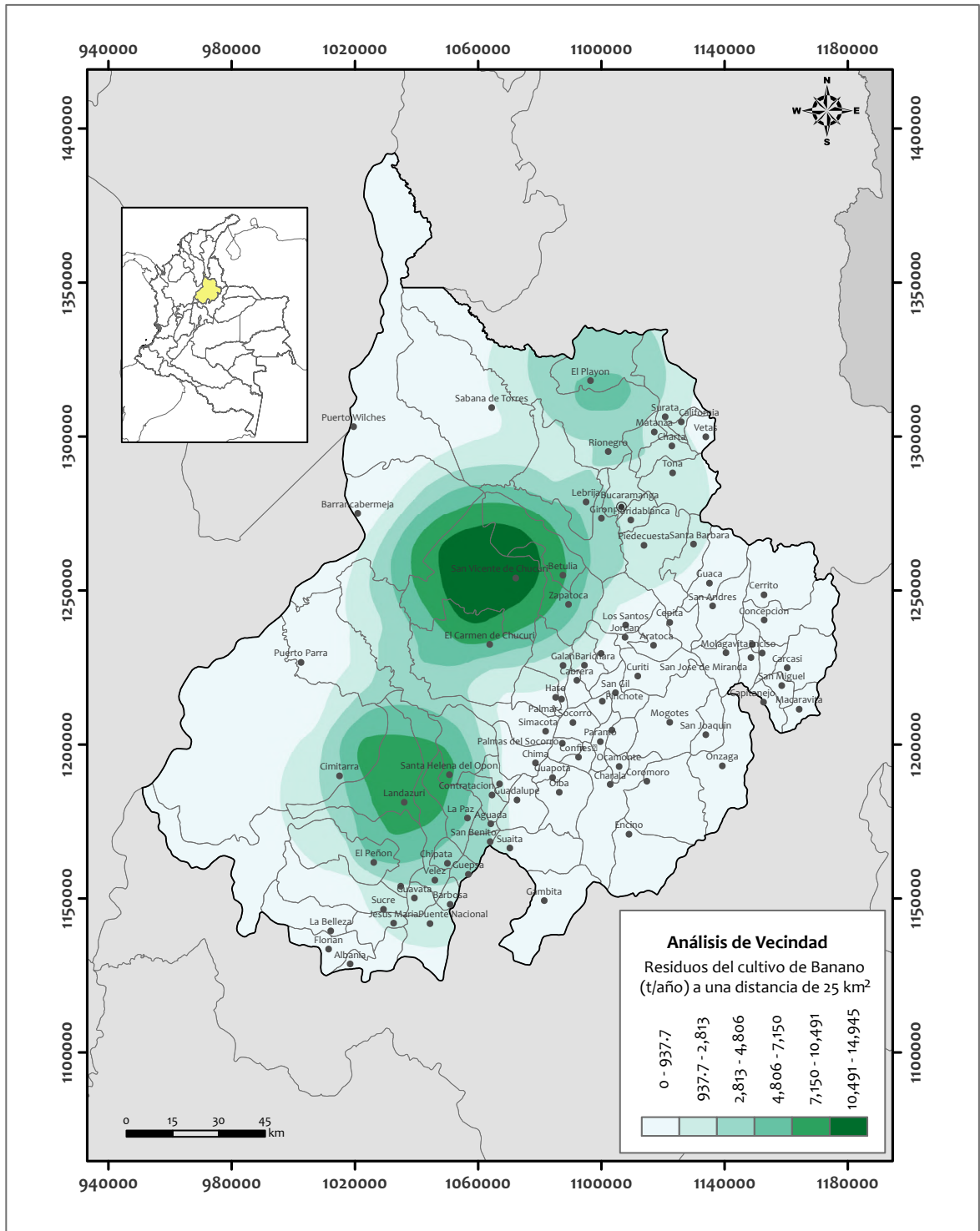


Figura D.4: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Banano en Santander

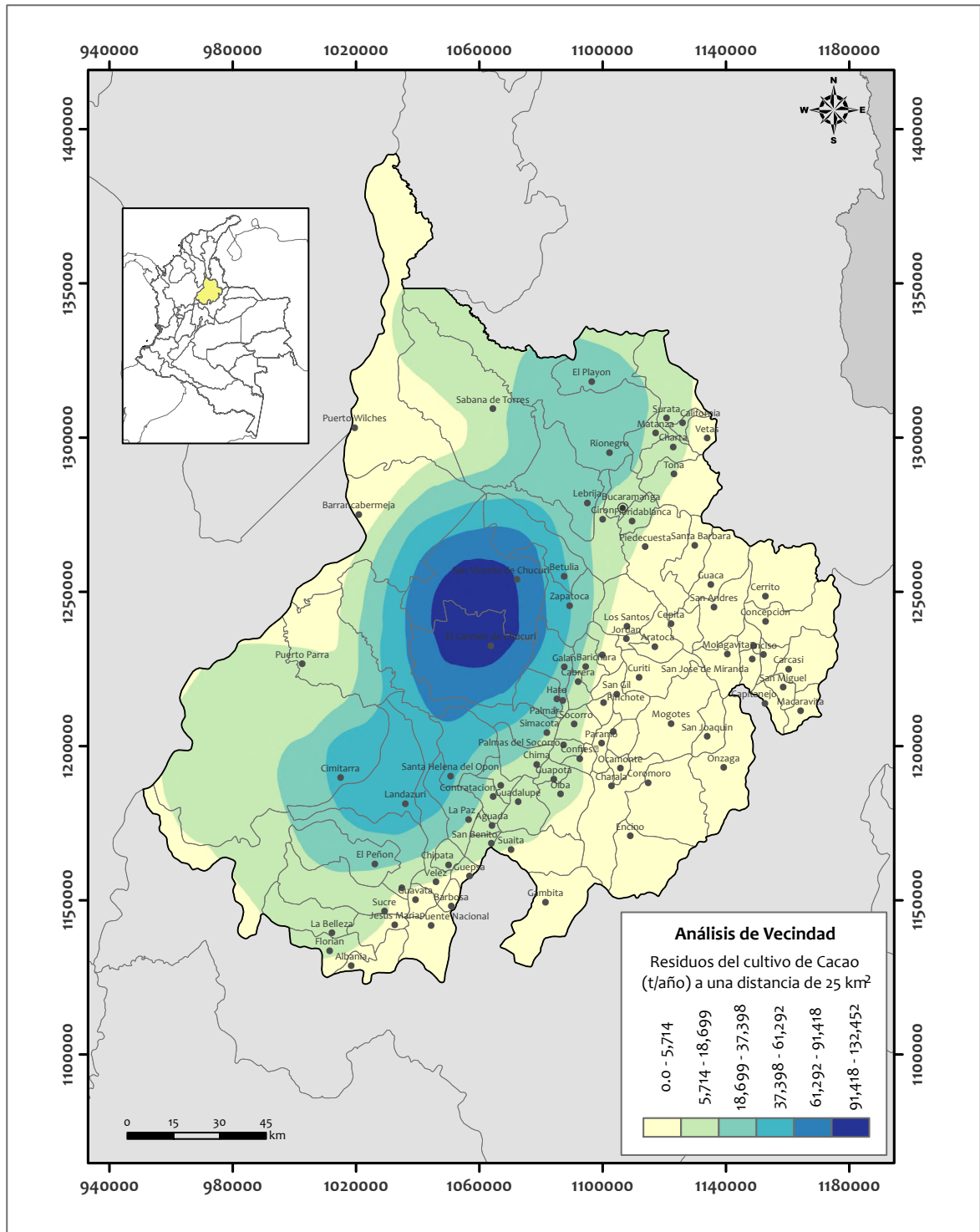


Figura D.5: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Cacao en Santander

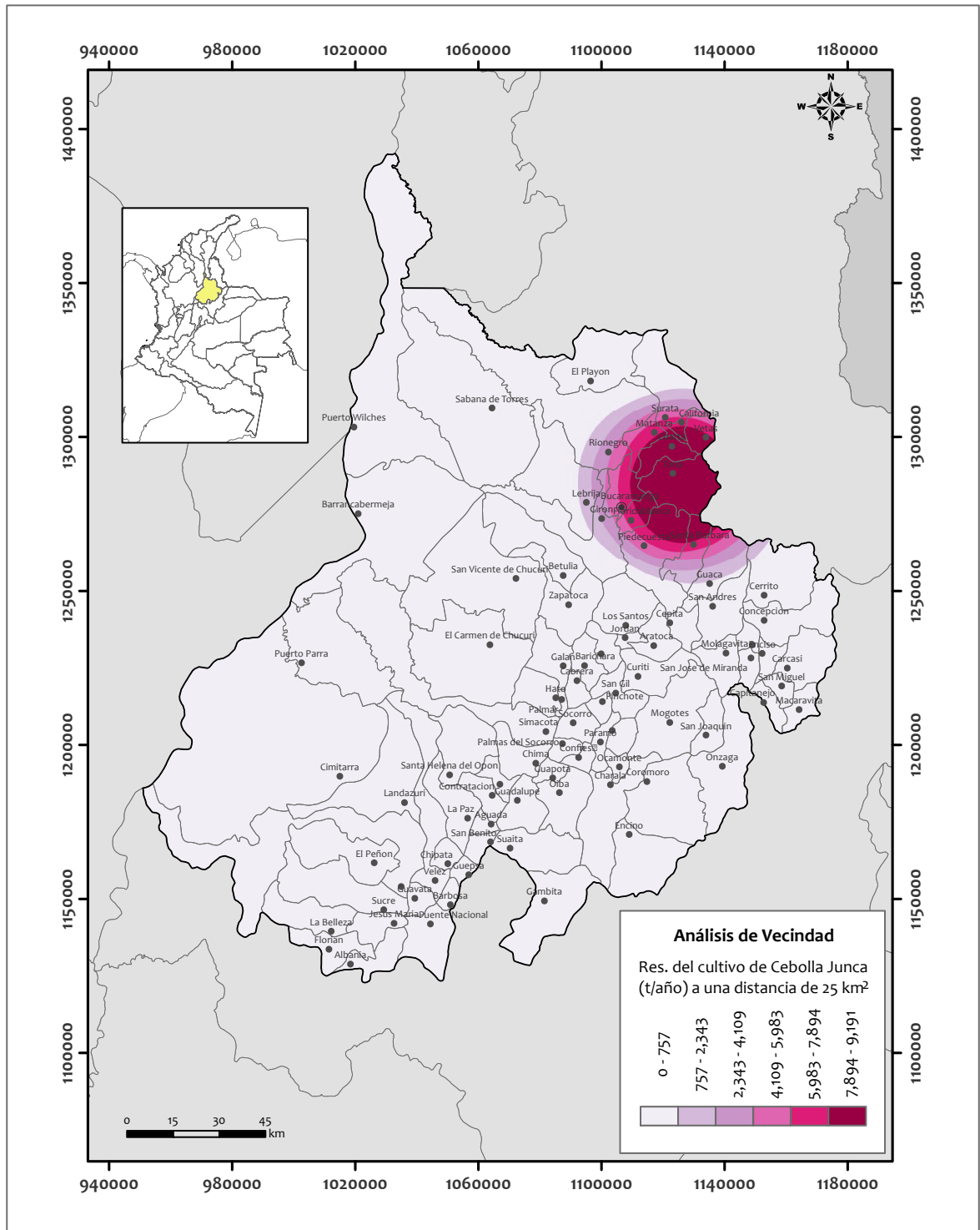


Figura D.8: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Cebolla Junca en Santander

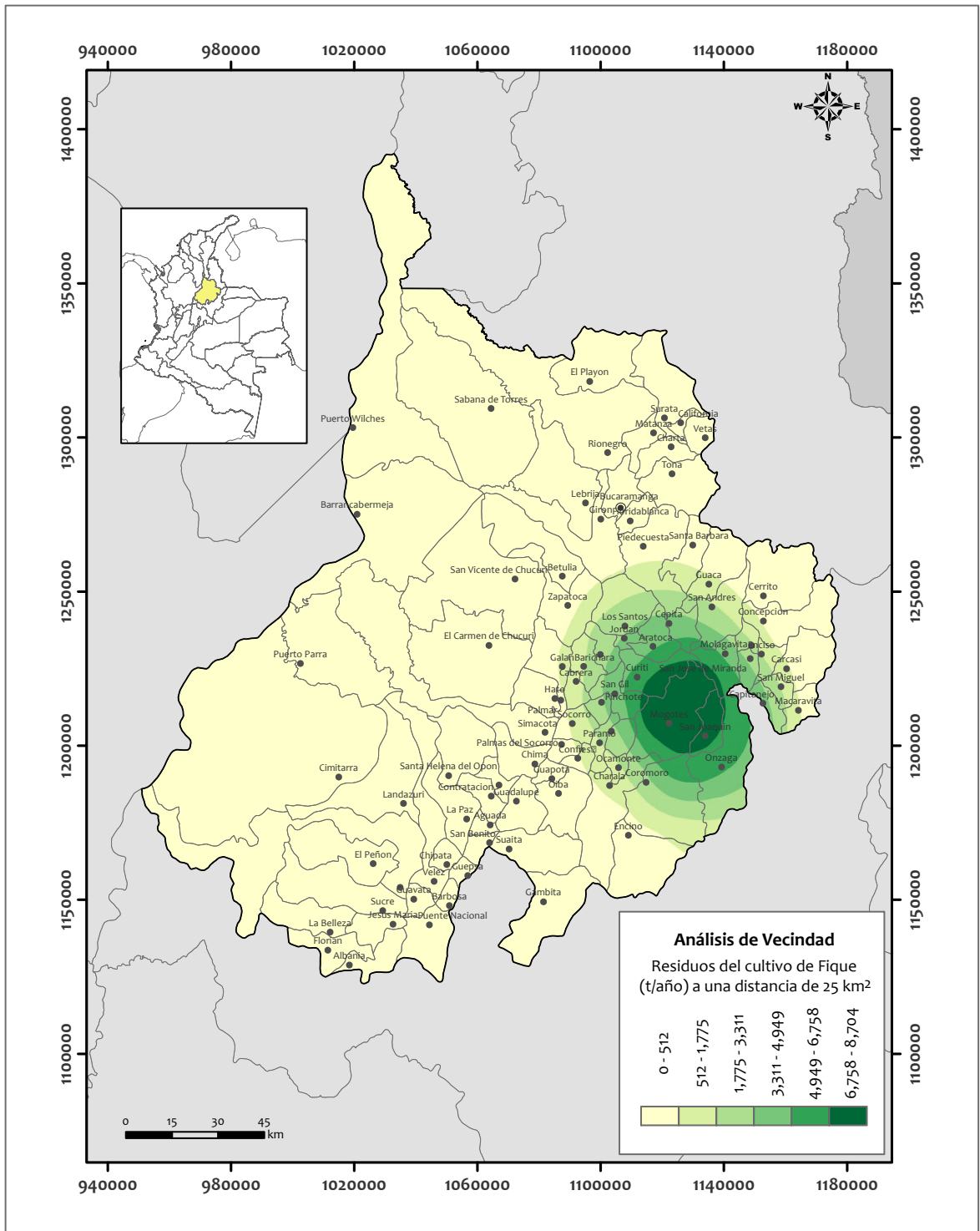


Figura D.9: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Figue en Santander

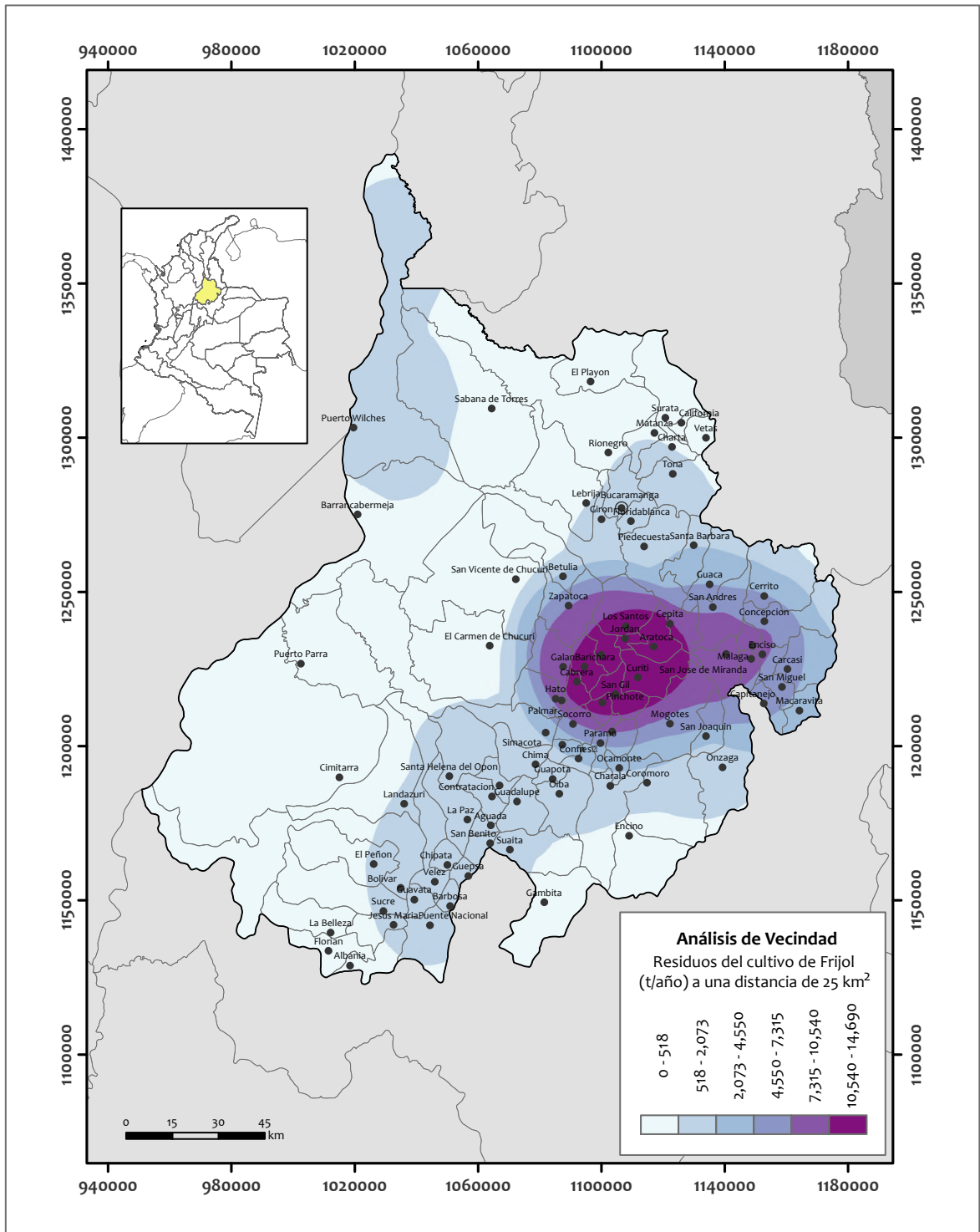


Figura D.10: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Frijol en Santander

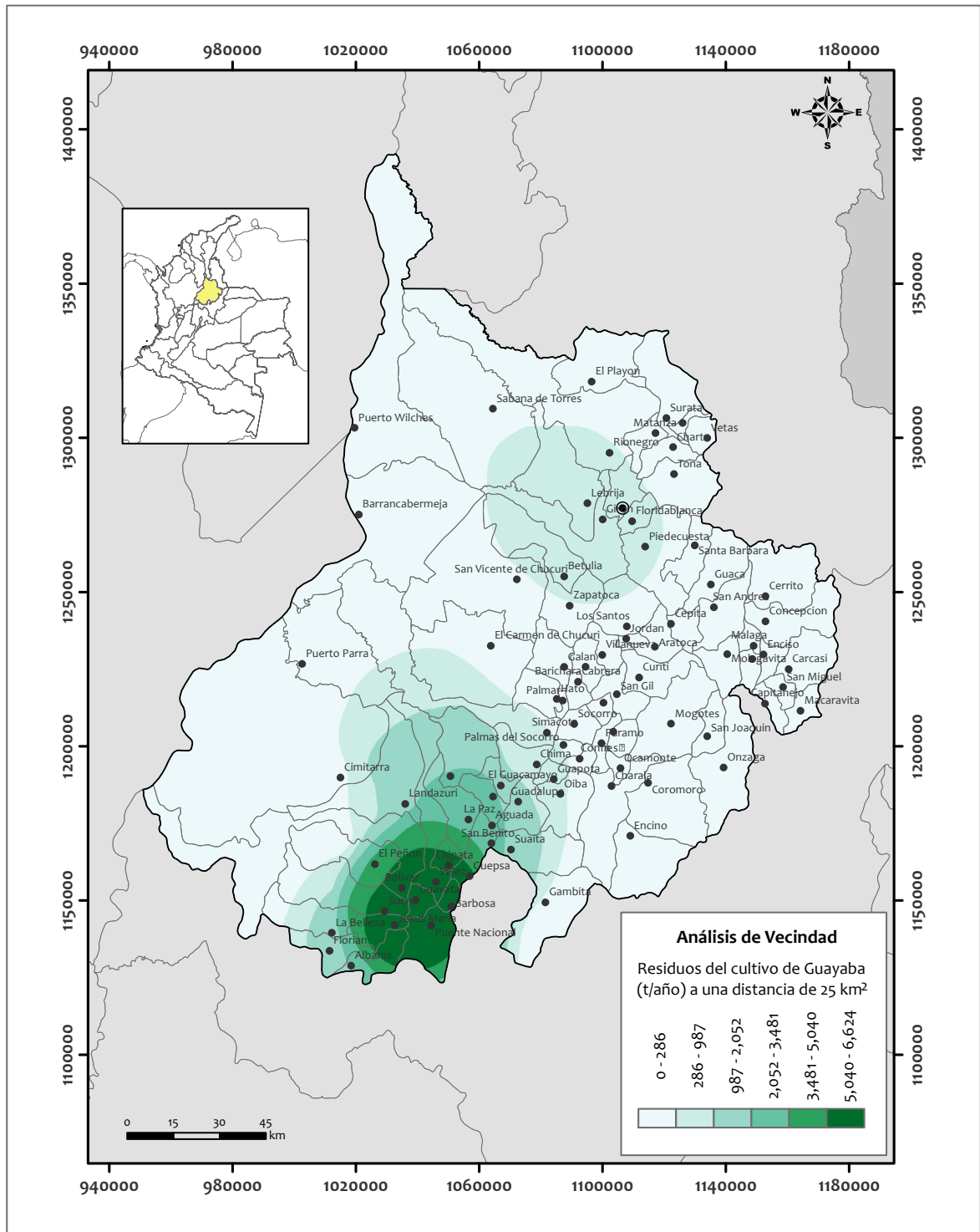


Figura D.11: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Guayaba en Santander

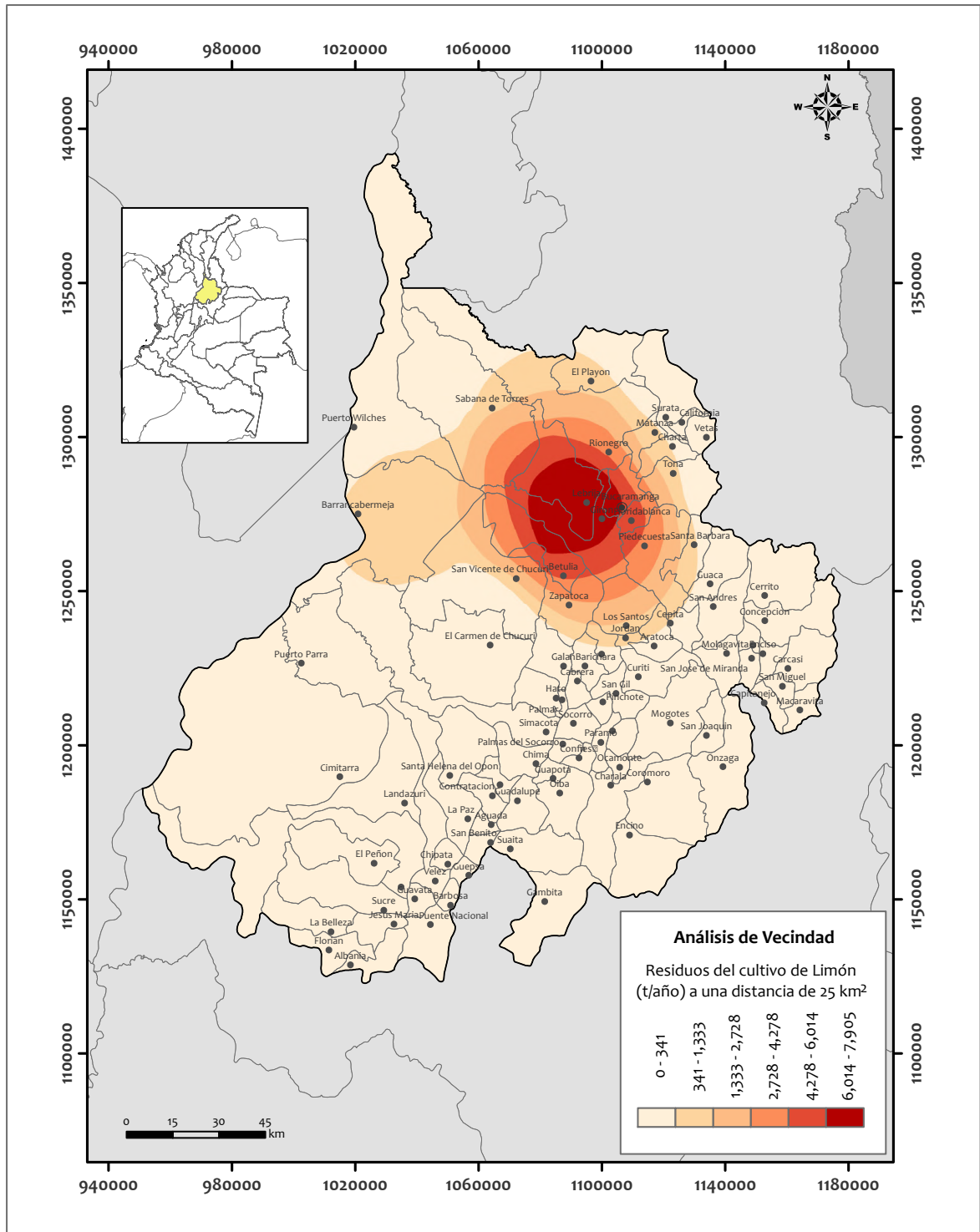


Figura D.12: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Limón en Santander

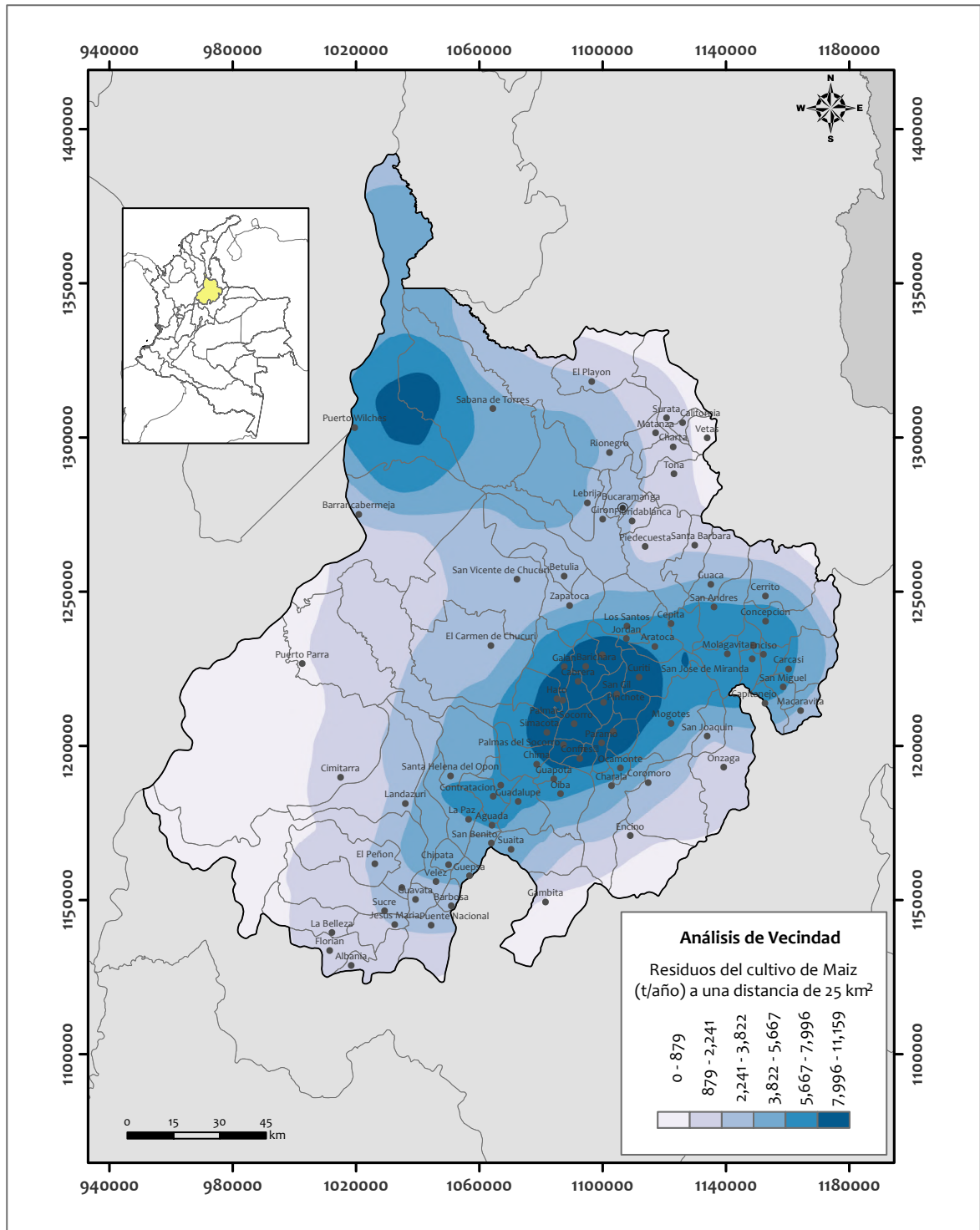


Figura D.13: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Maíz en Santander

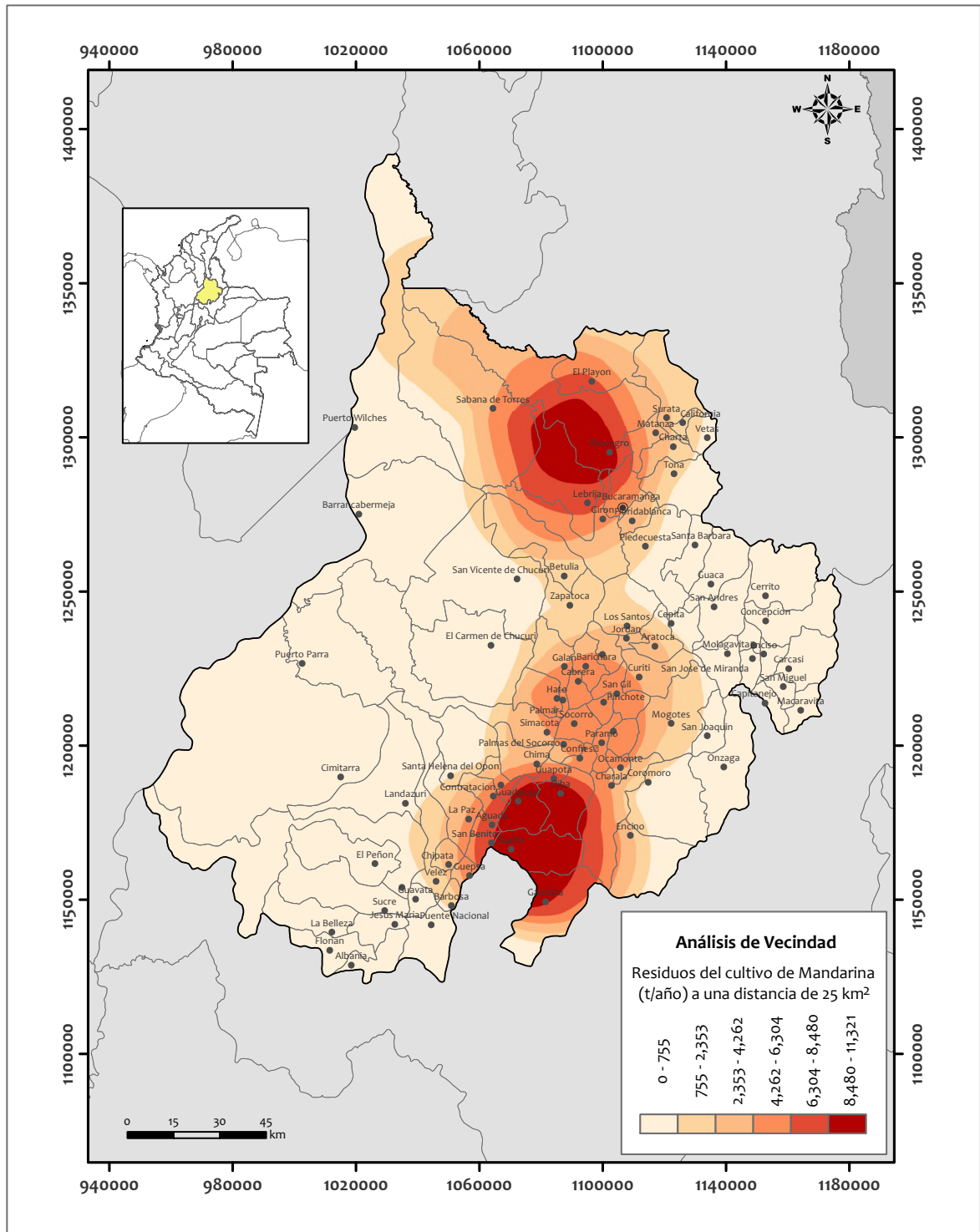


Figura D.14: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Mandarina en Santander

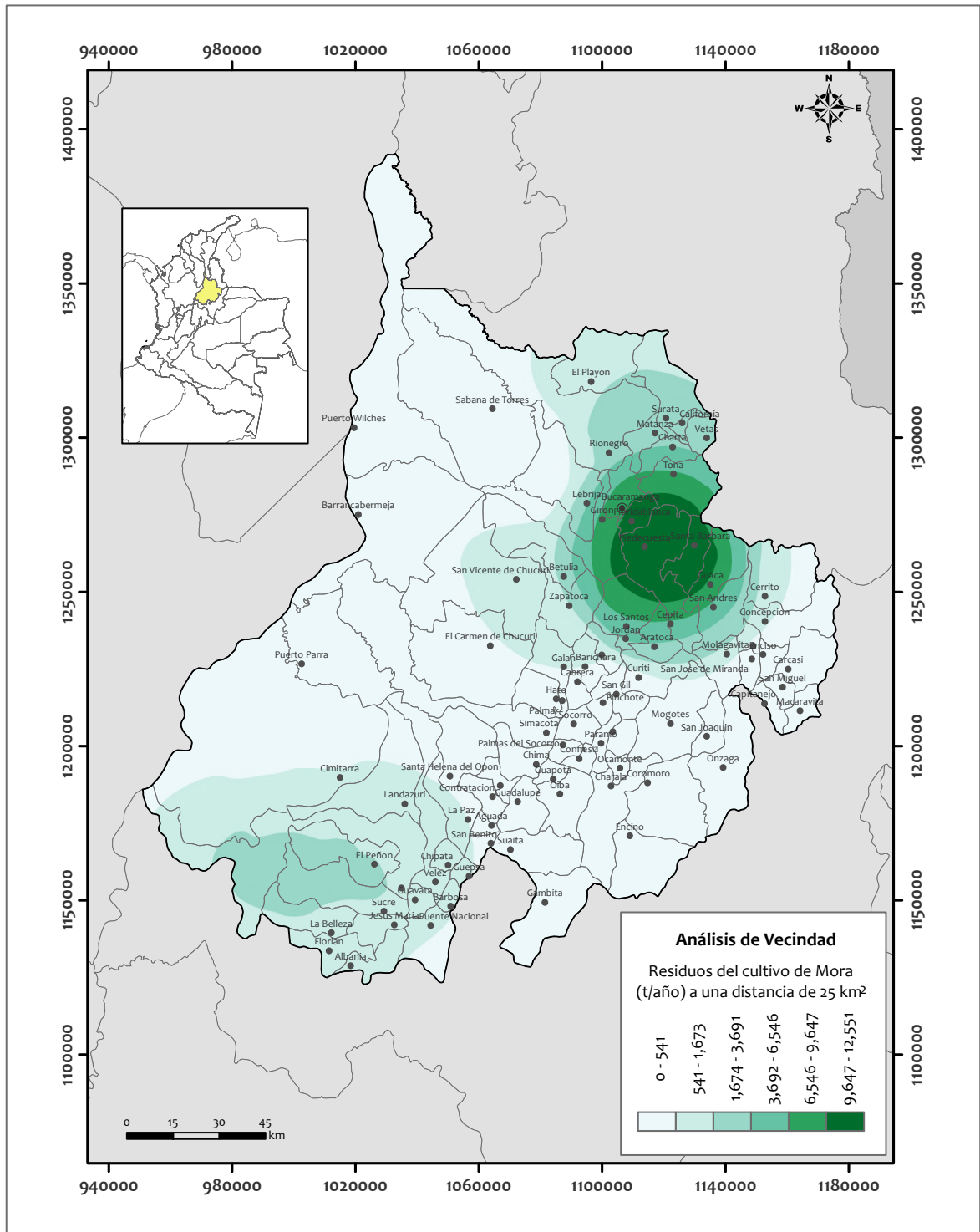


Figura D.15: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Mora en Santander

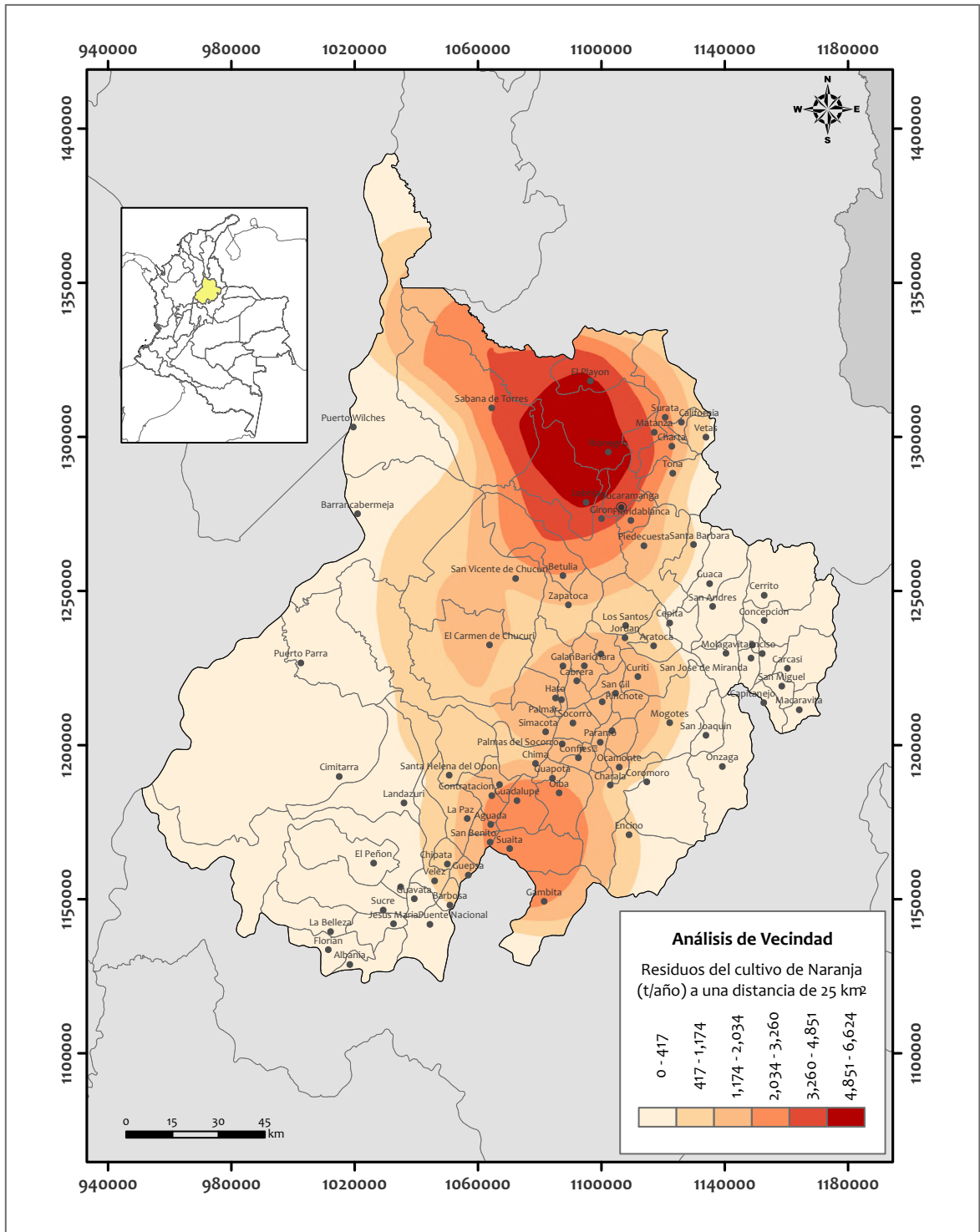


Figura D.16: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Naranja en Santander

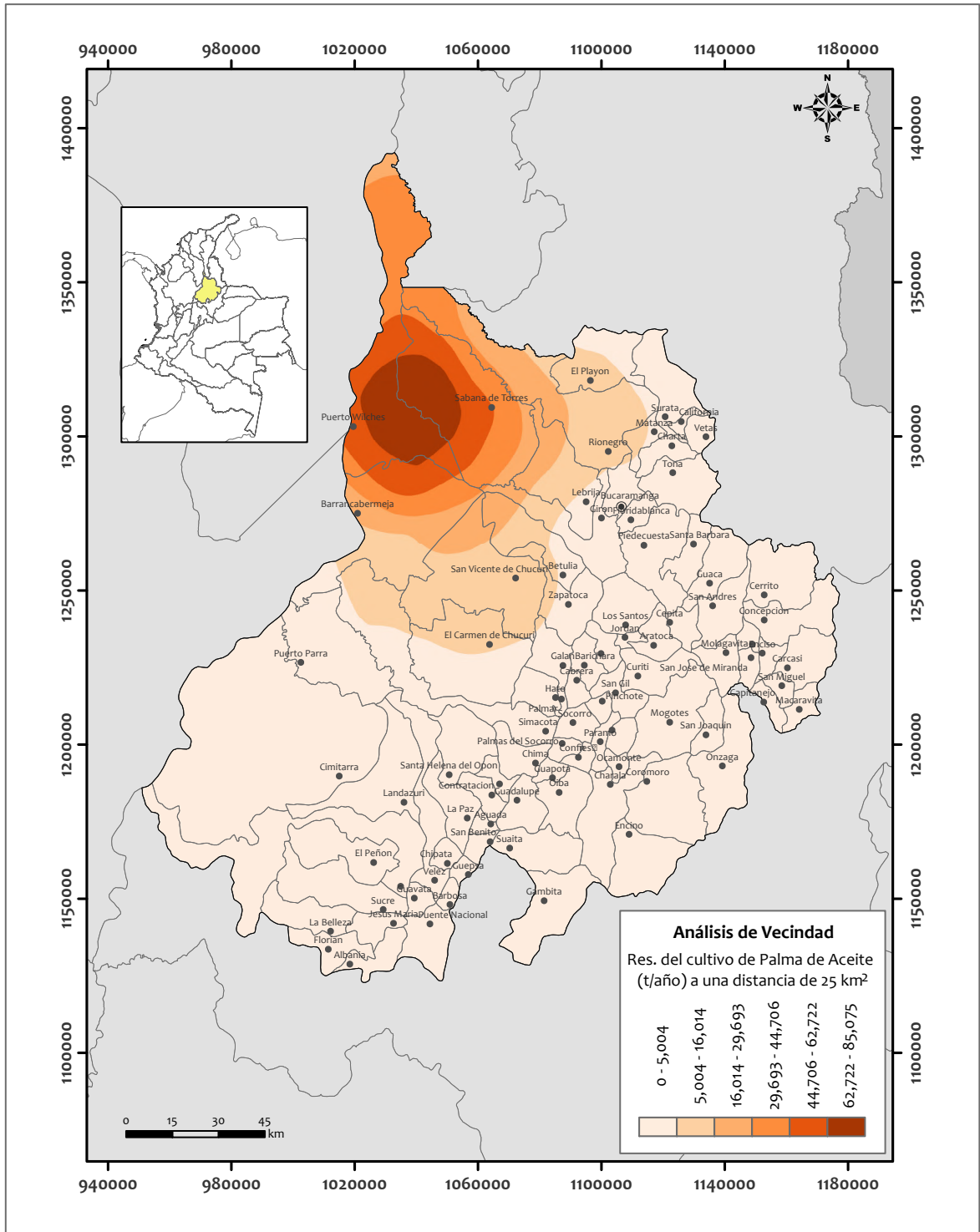


Figura D.17: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Palma de Aceite en Santander

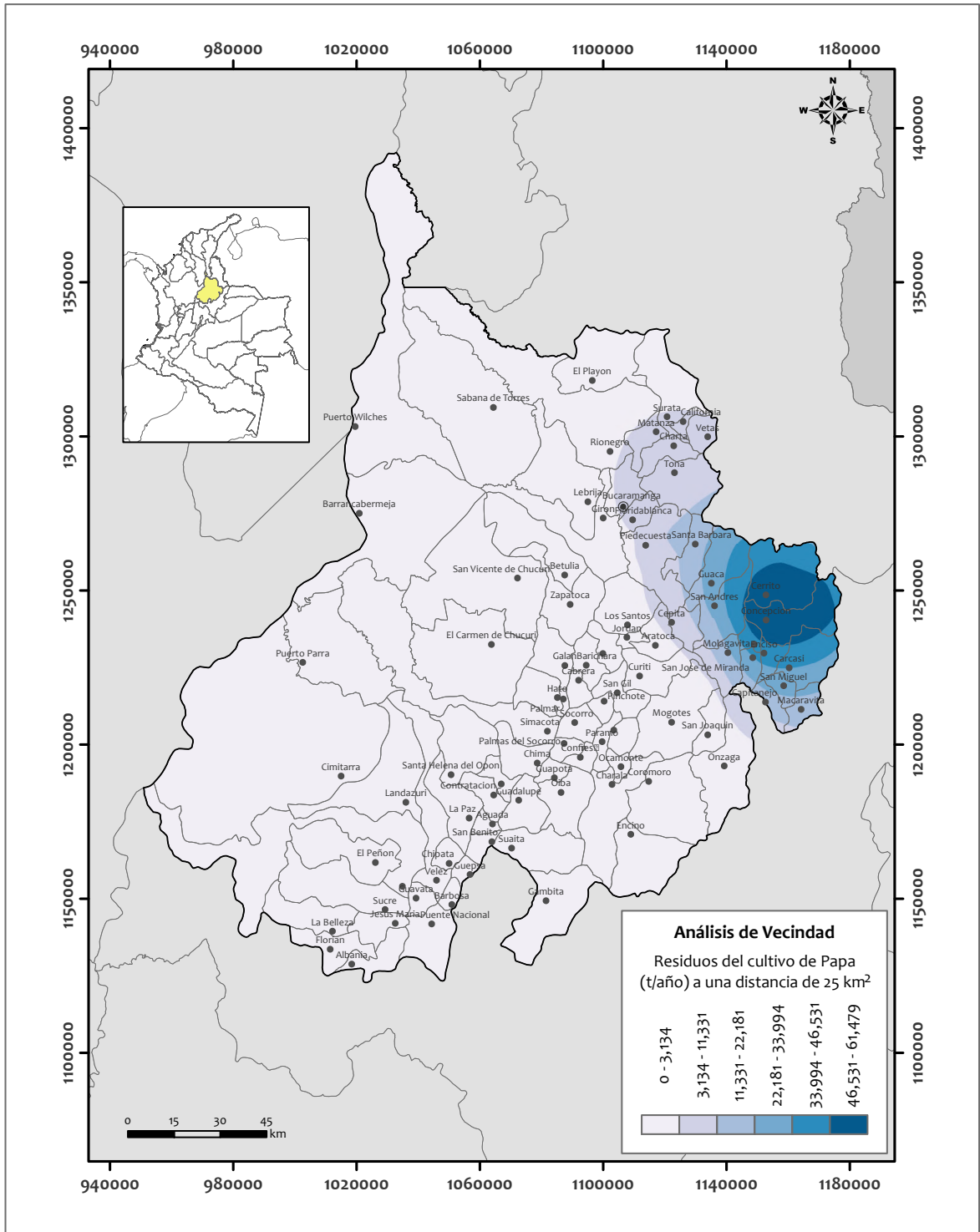


Figura D.18: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Papa en Santander

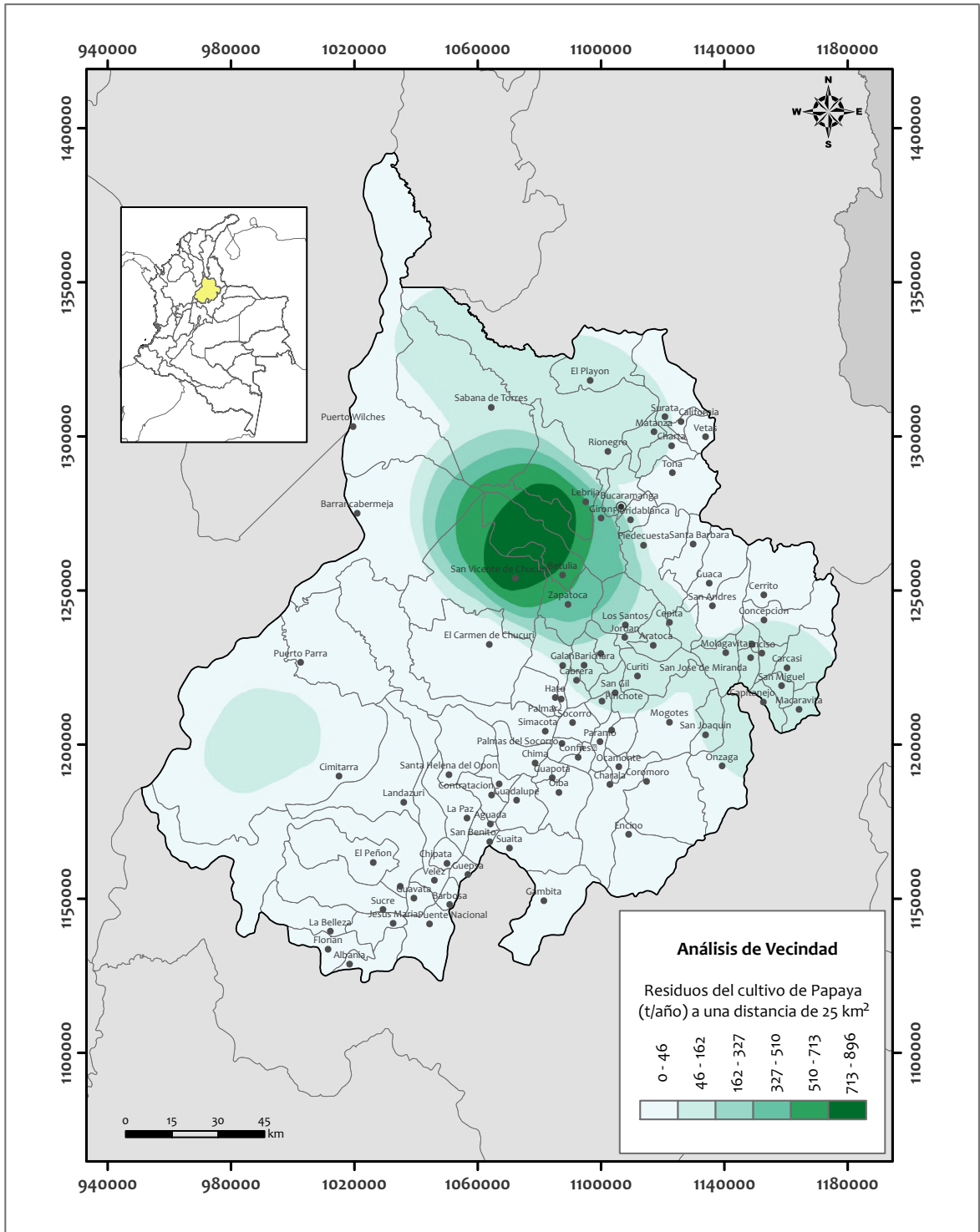


Figura D.19: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Papaya en Santander

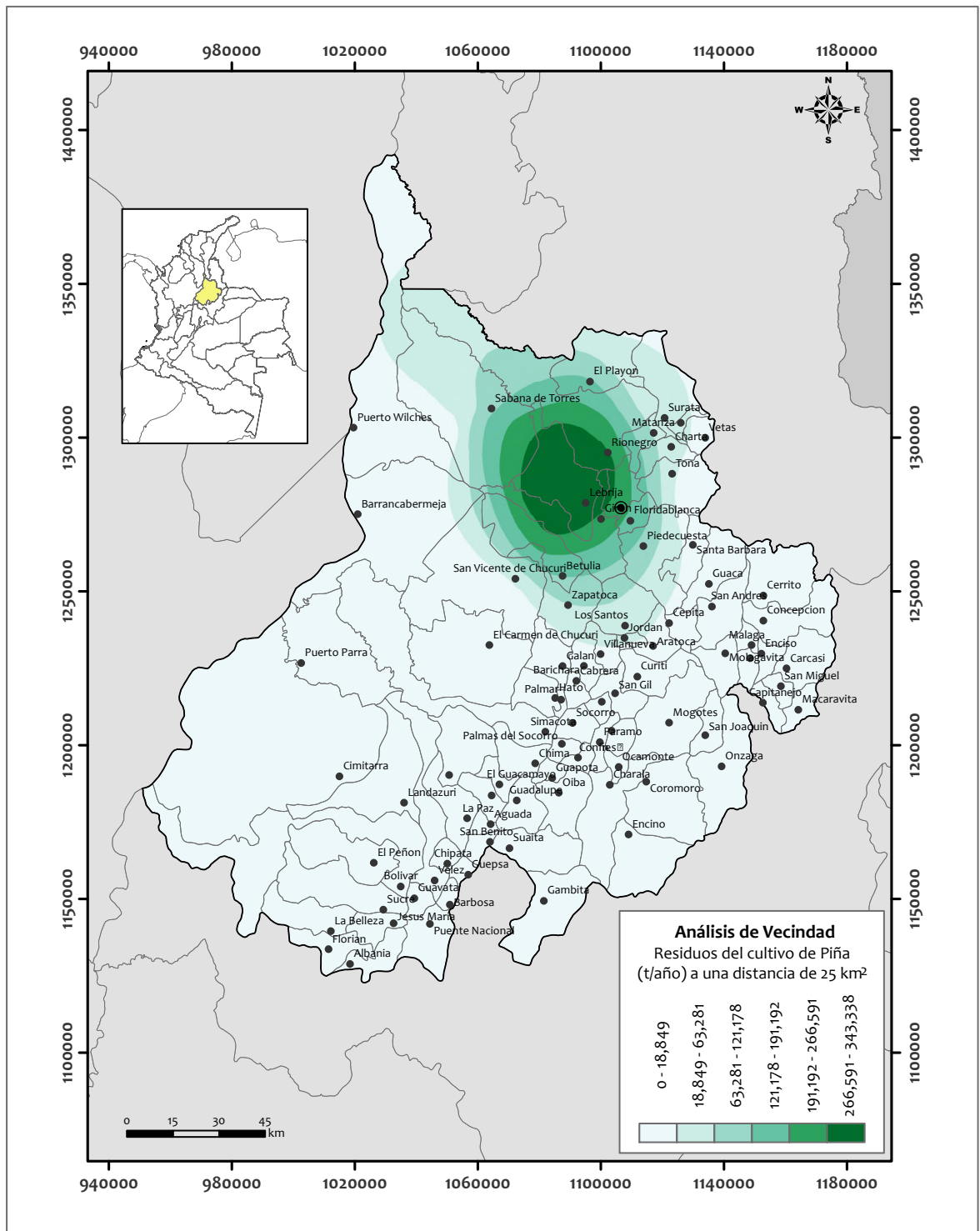


Figura D.20: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Piña en Santander

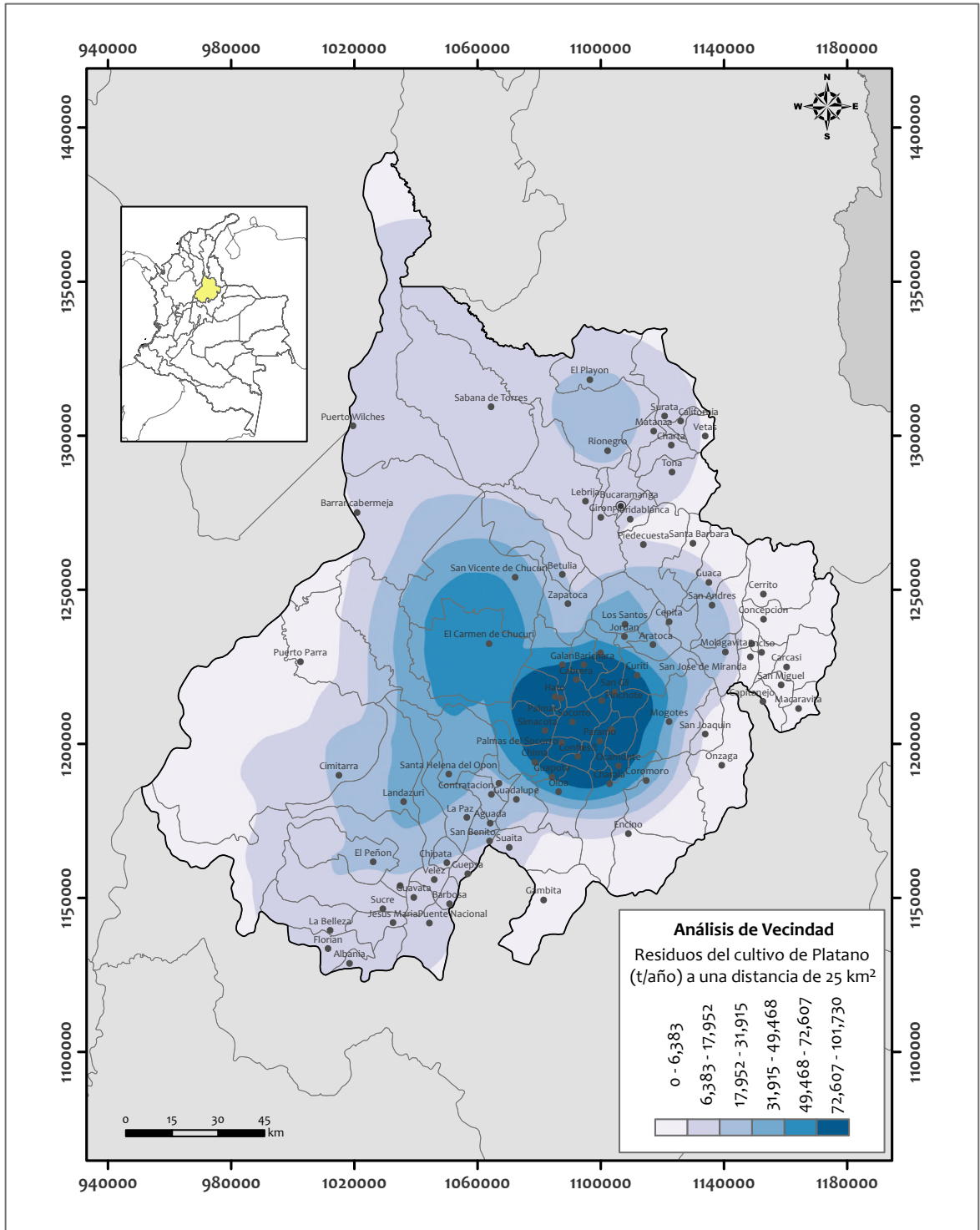


Figura D.21: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Plátano en Santander

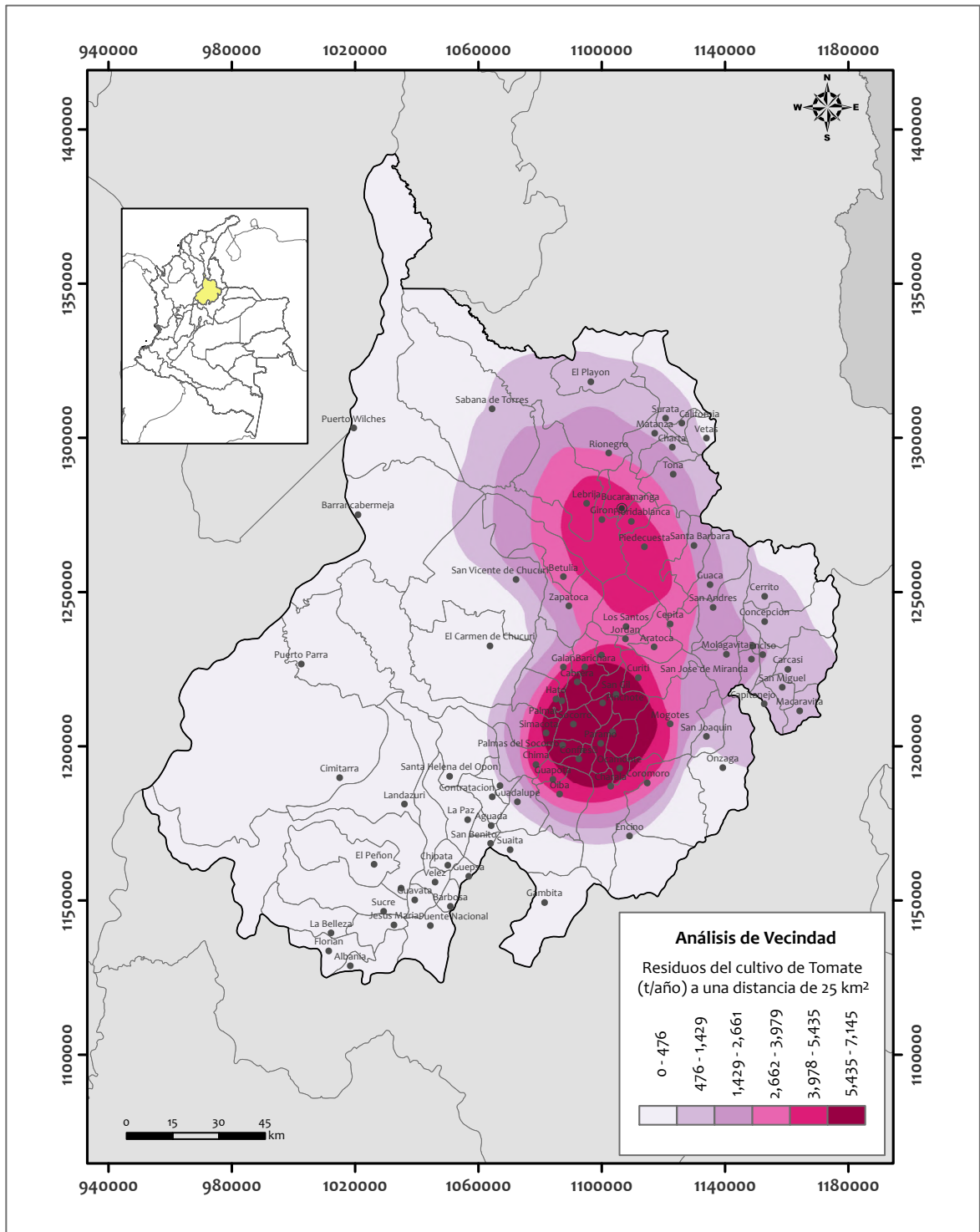


Figura D.22: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Tomate en Santander

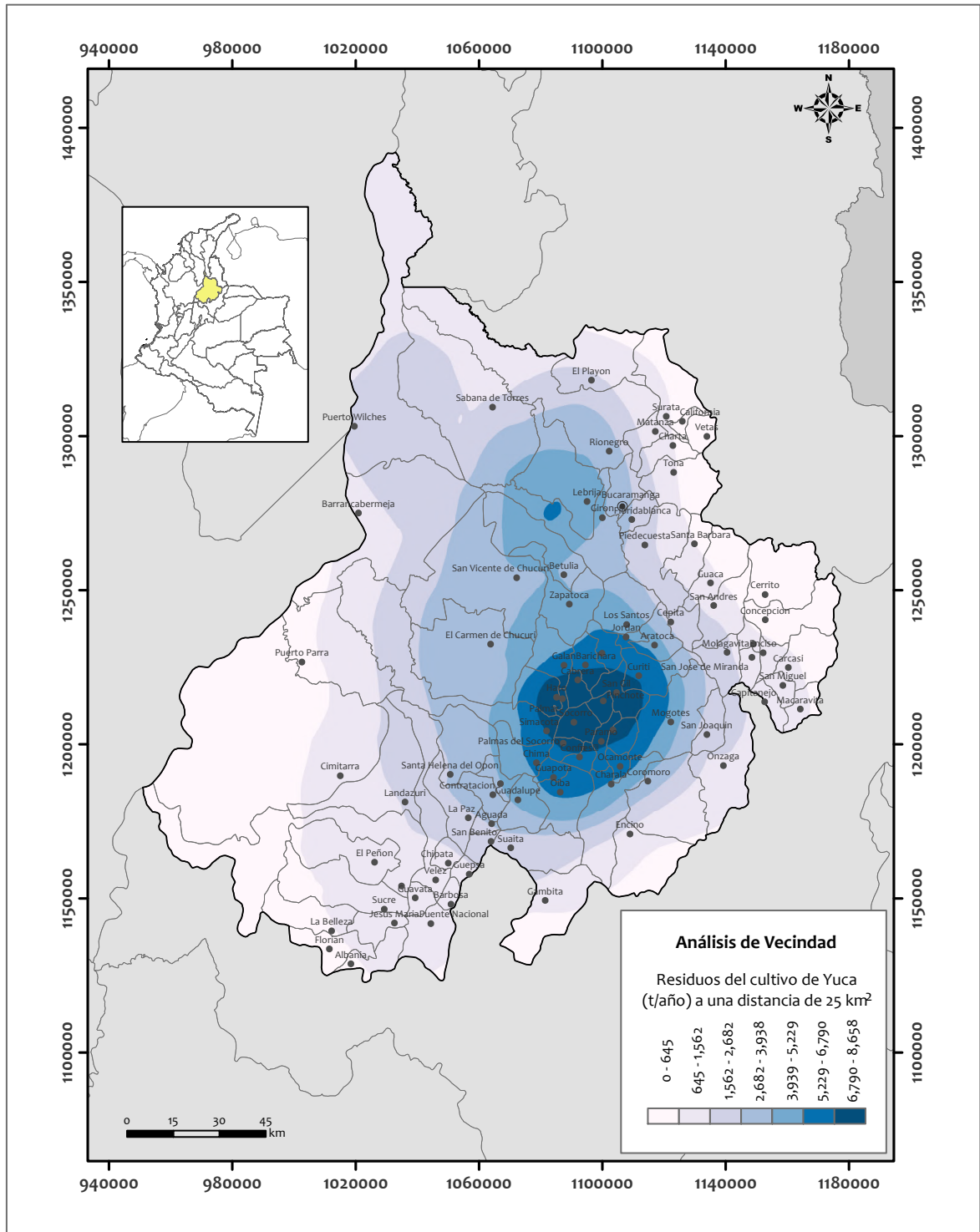


Figura D.23: Mapa del análisis de vecindad del cultivo de Yuca en Santander

E

Cartografía III

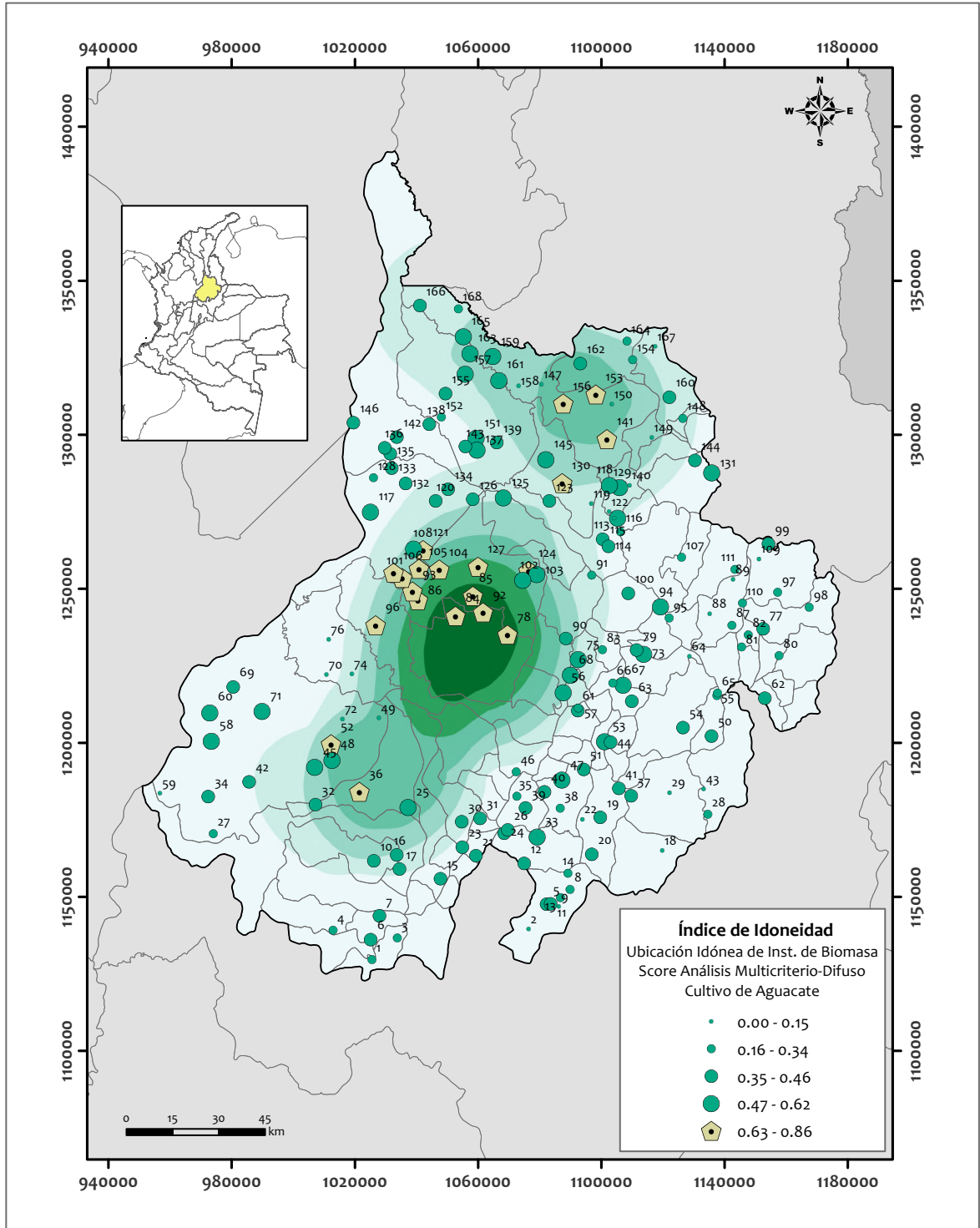


Figura E.1: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Aguacate

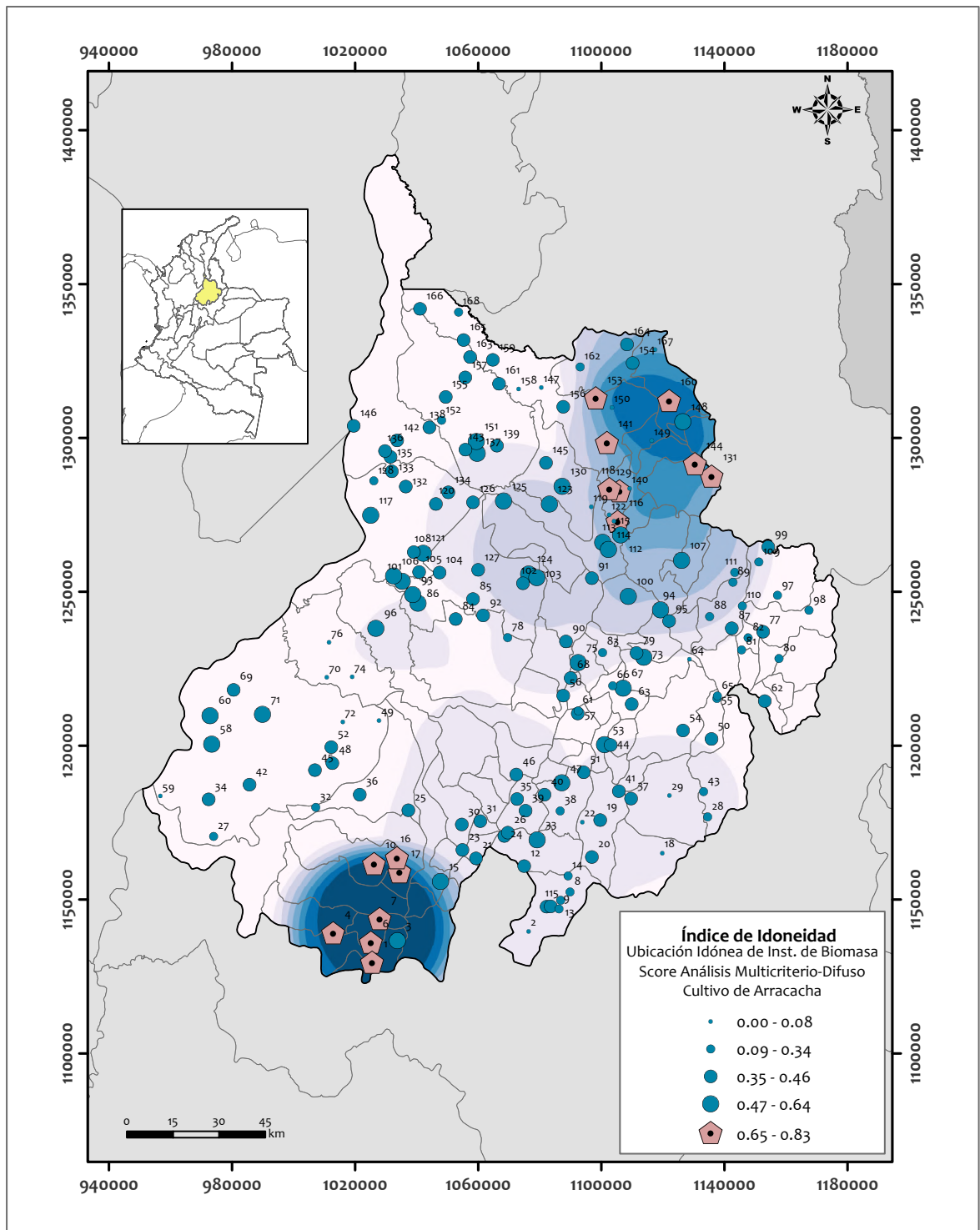


Figura E.2: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Arracacha

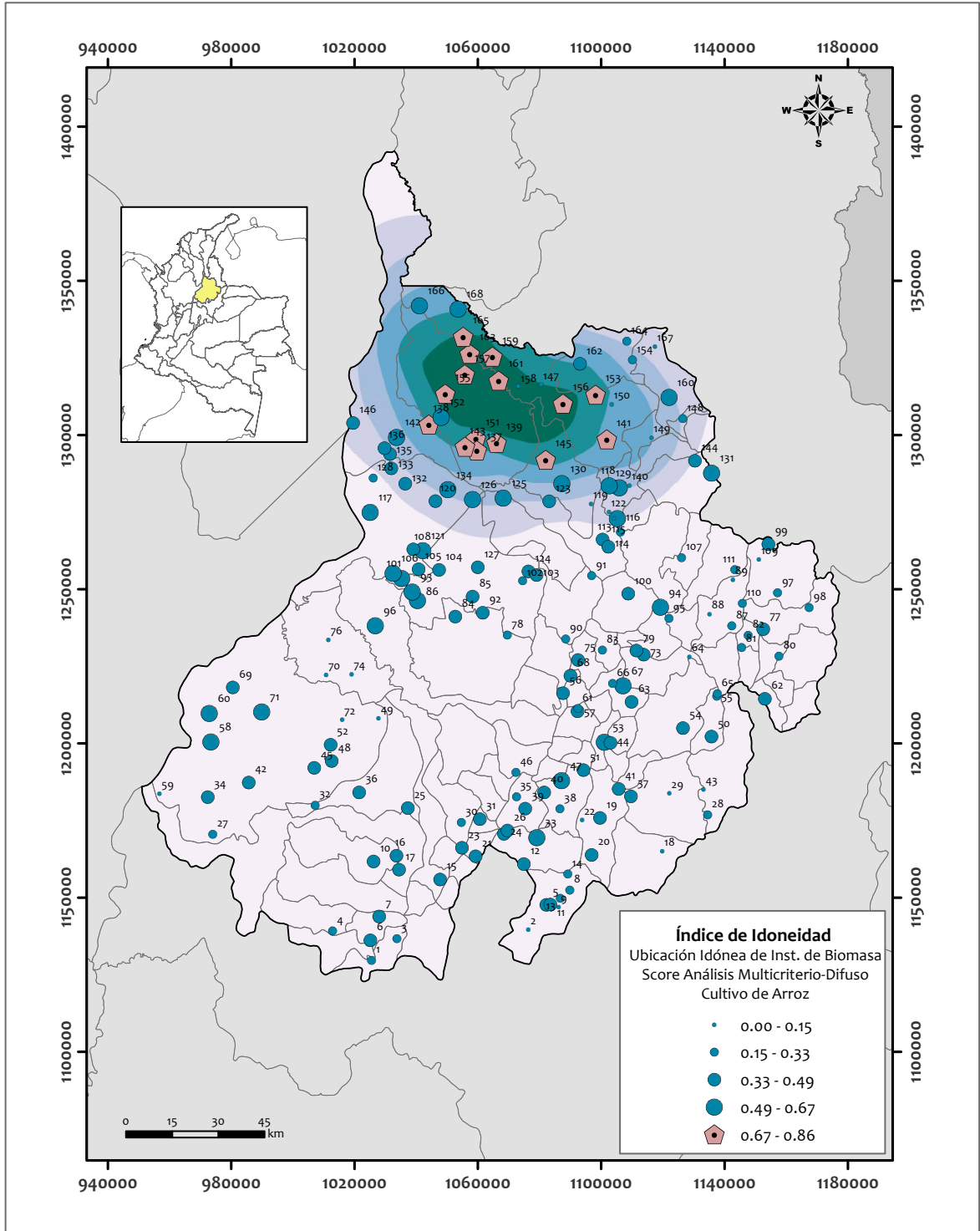


Figura E.3: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Arroz

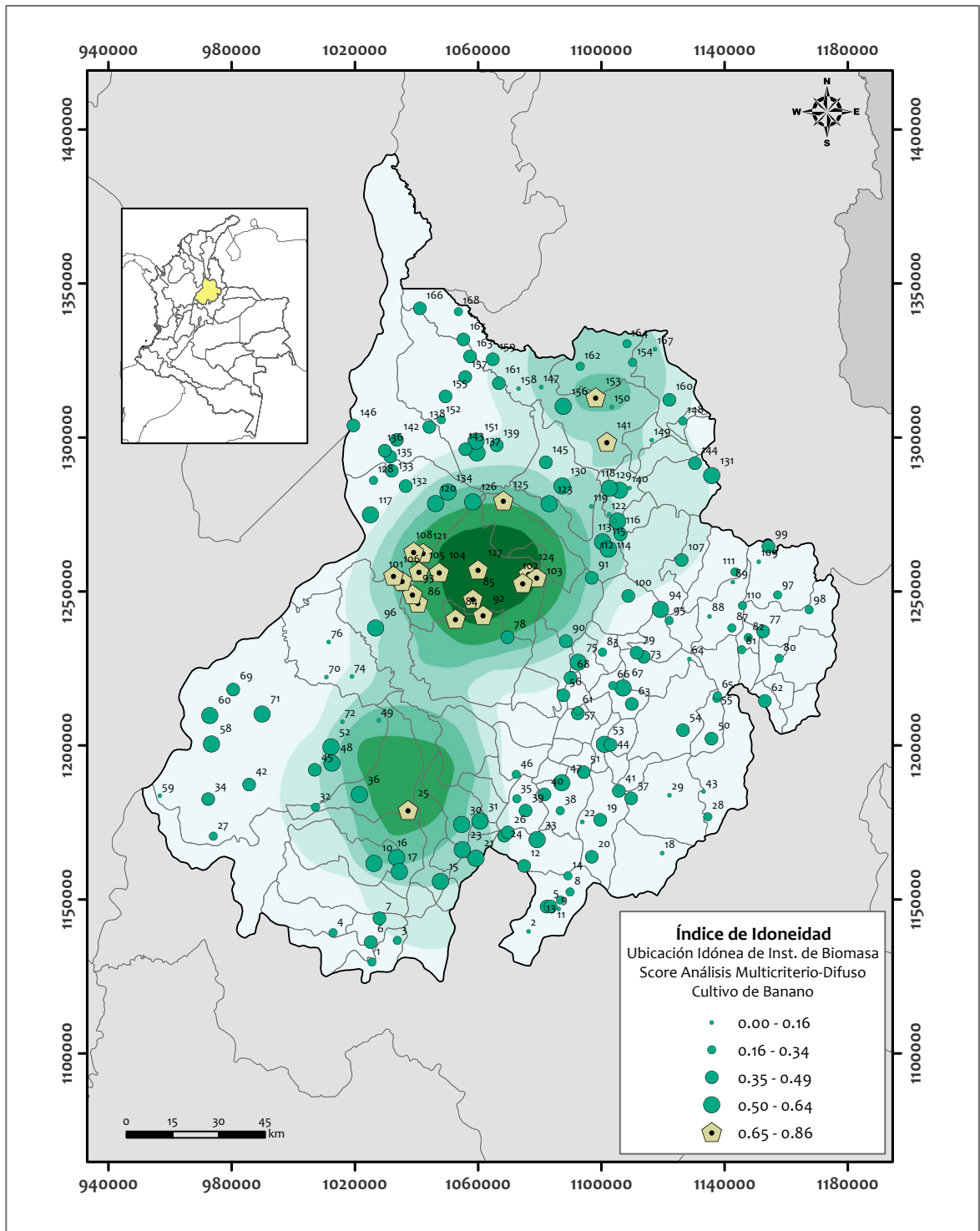


Figura E.4: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Banano

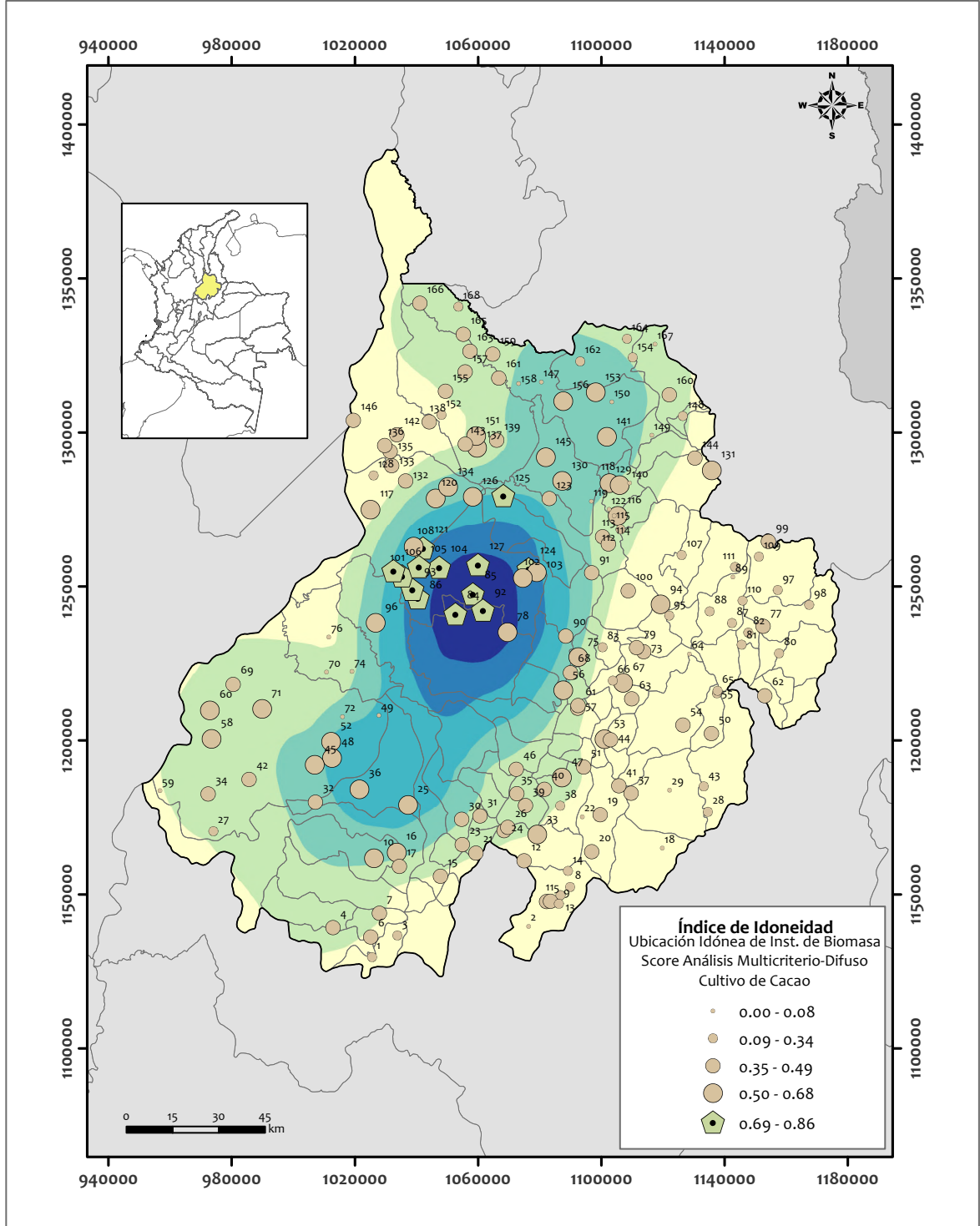


Figura E.5: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Cacao

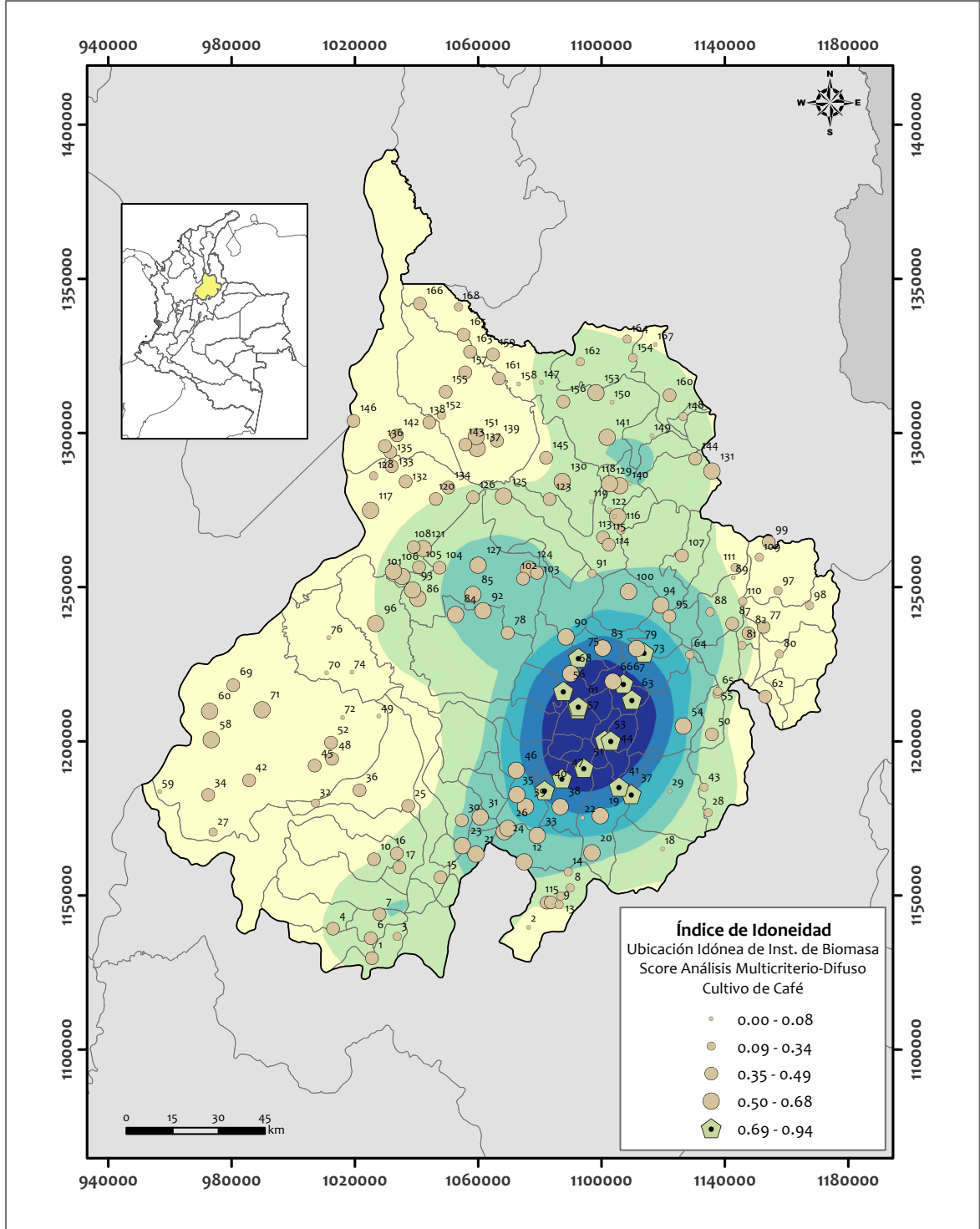


Figura E.6: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Café

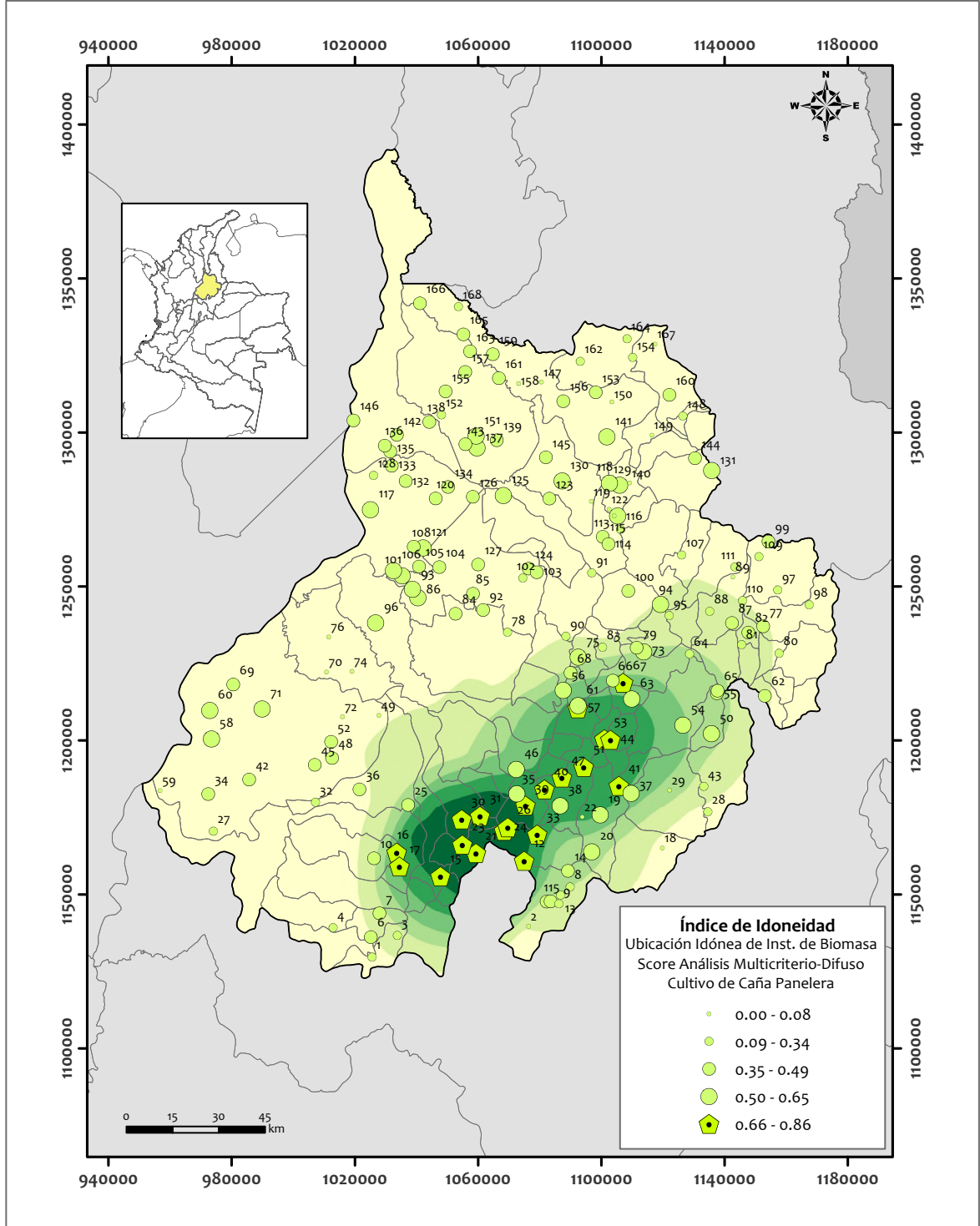


Figura E.7: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Caña Panelera

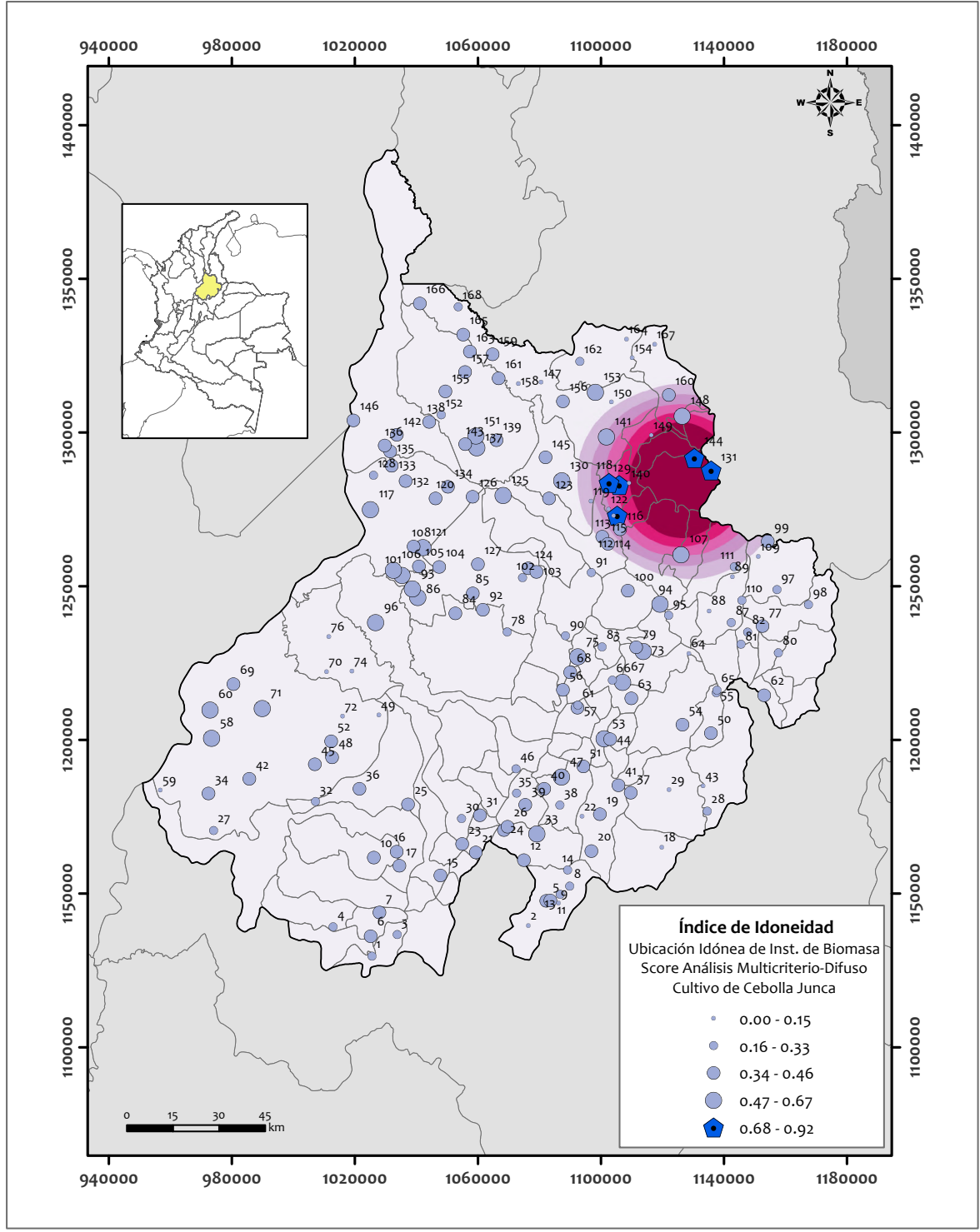


Figura E.8: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Cebolla Junca

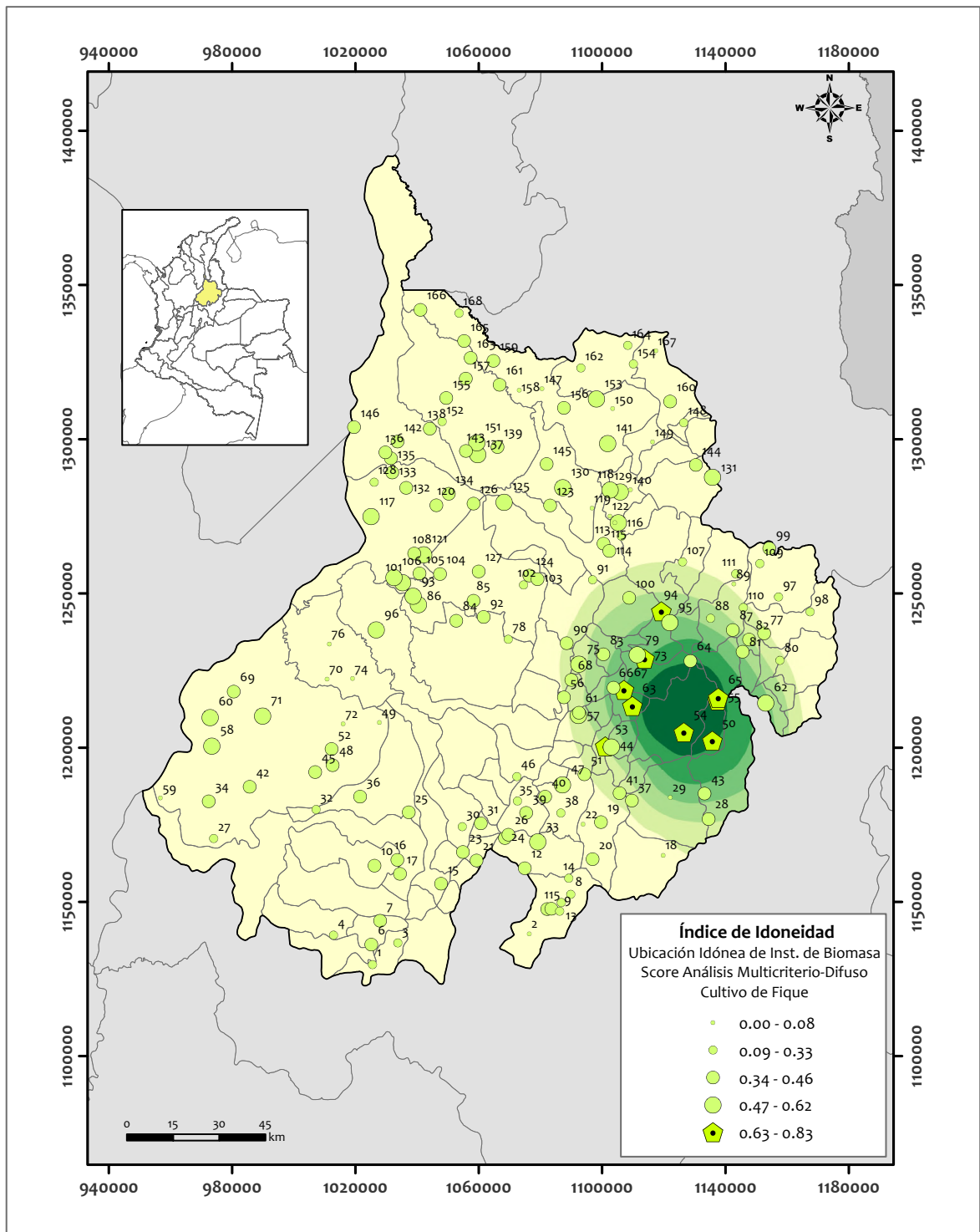


Figura E.9: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Fique

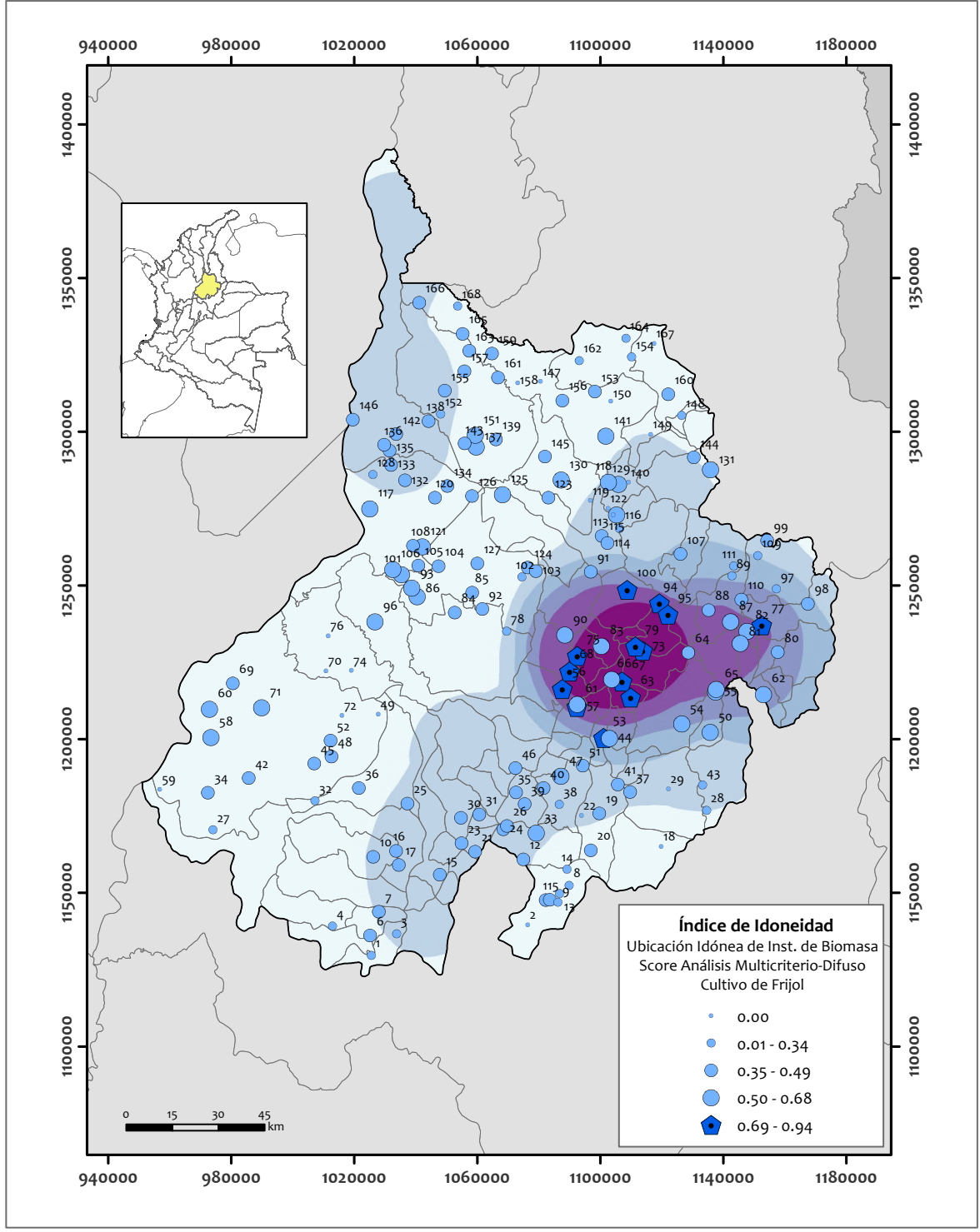


Figura E.10: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Frijol

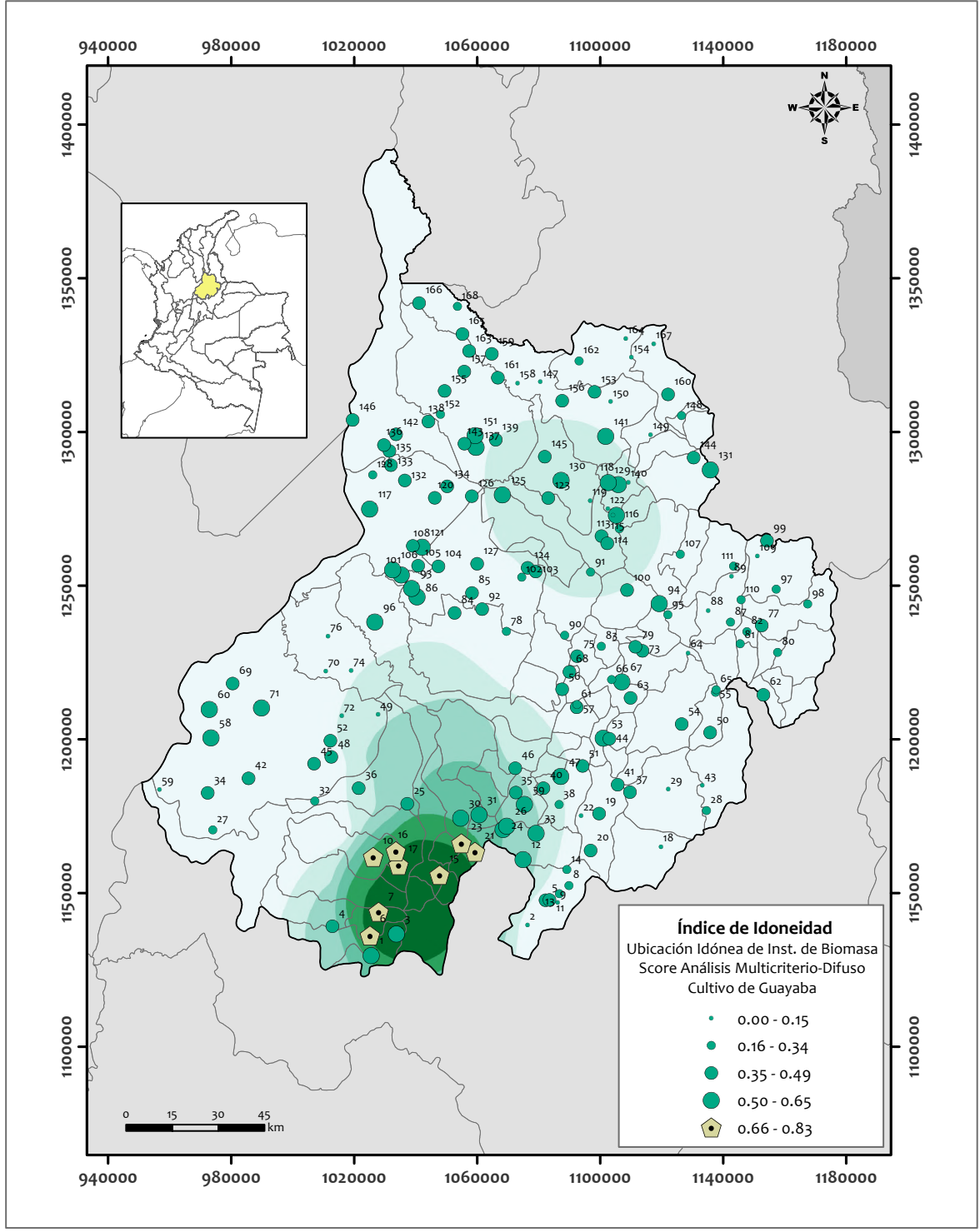


Figura E.11: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Guayaba

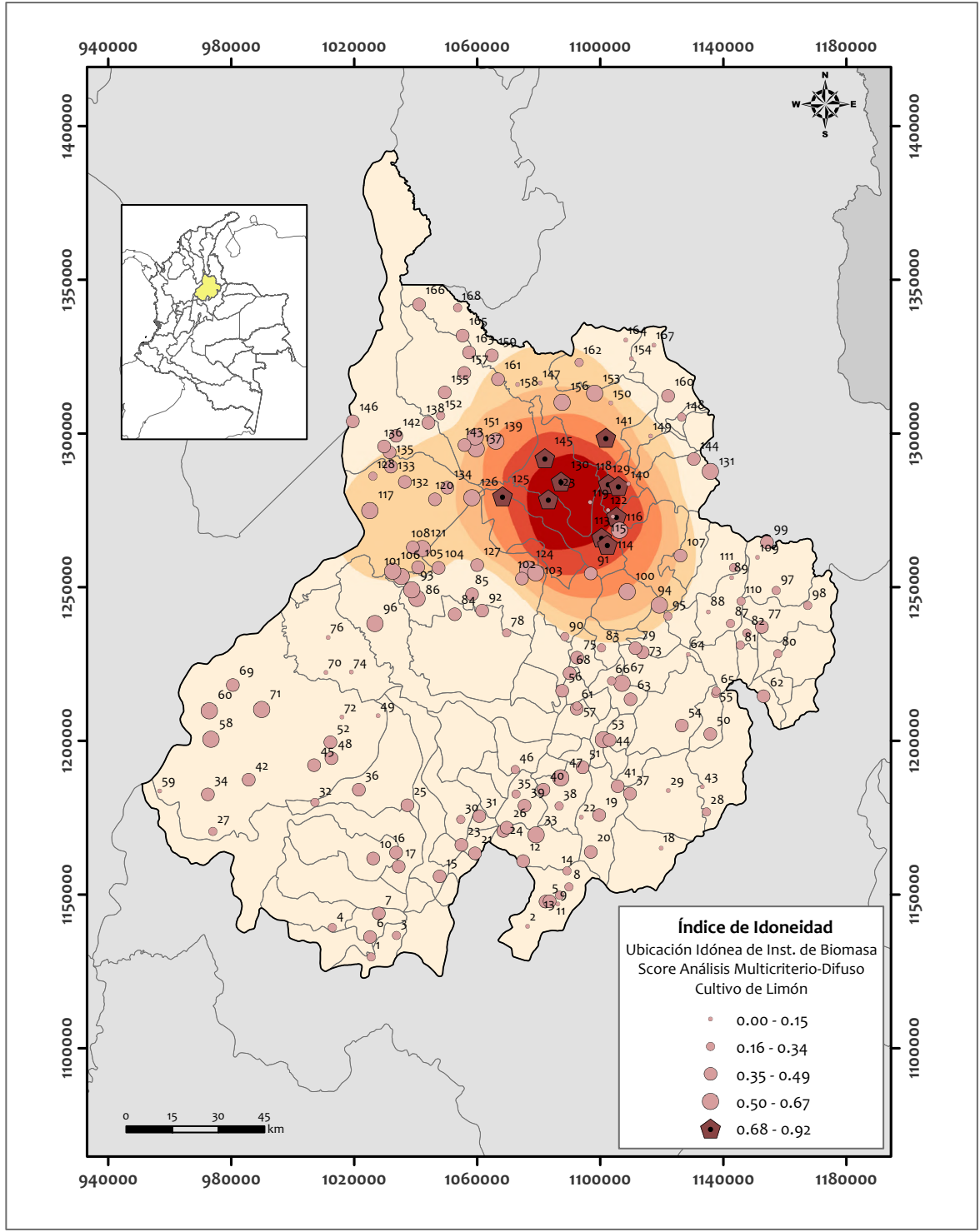


Figura E.12: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Limón

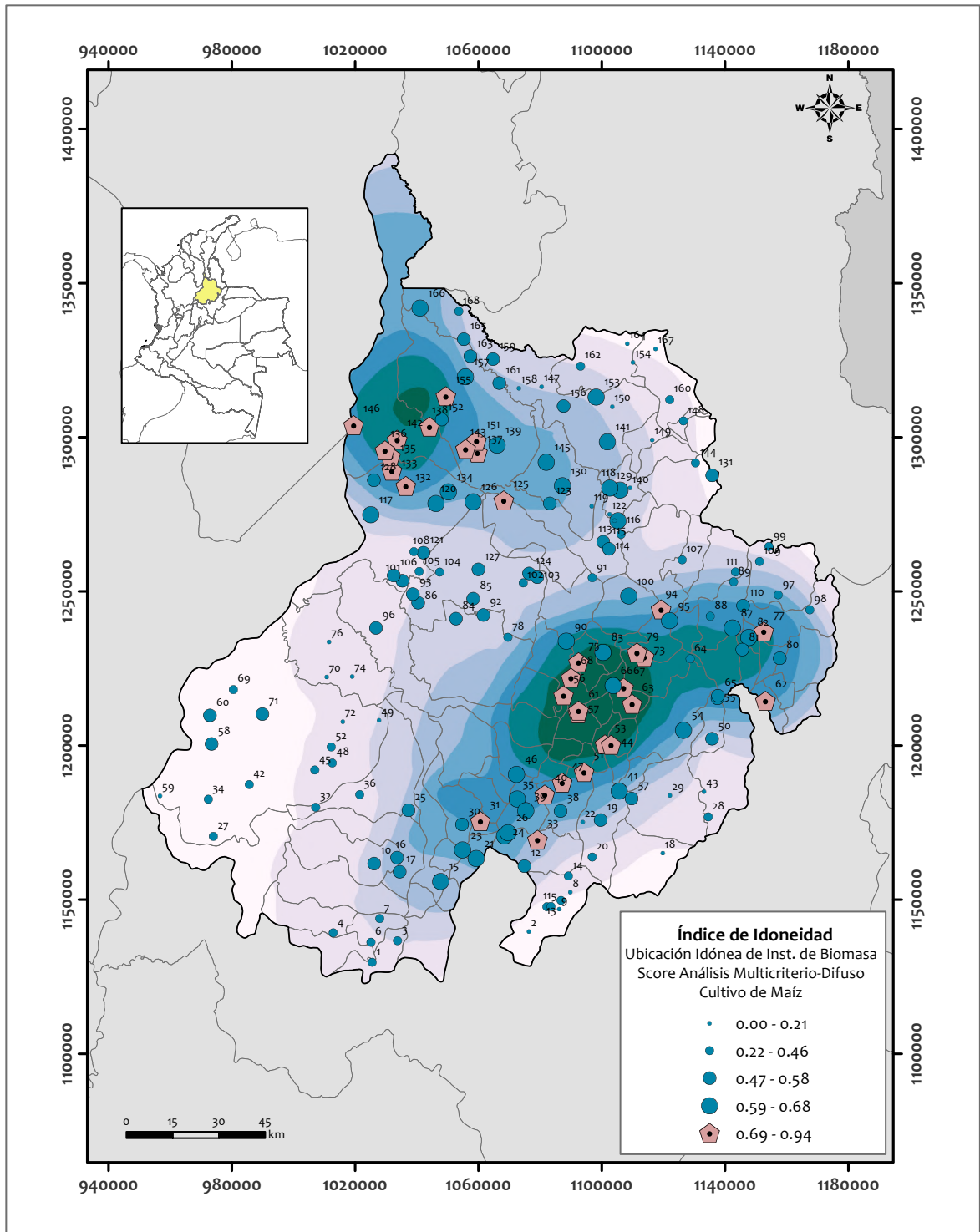


Figura E.13: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Maíz

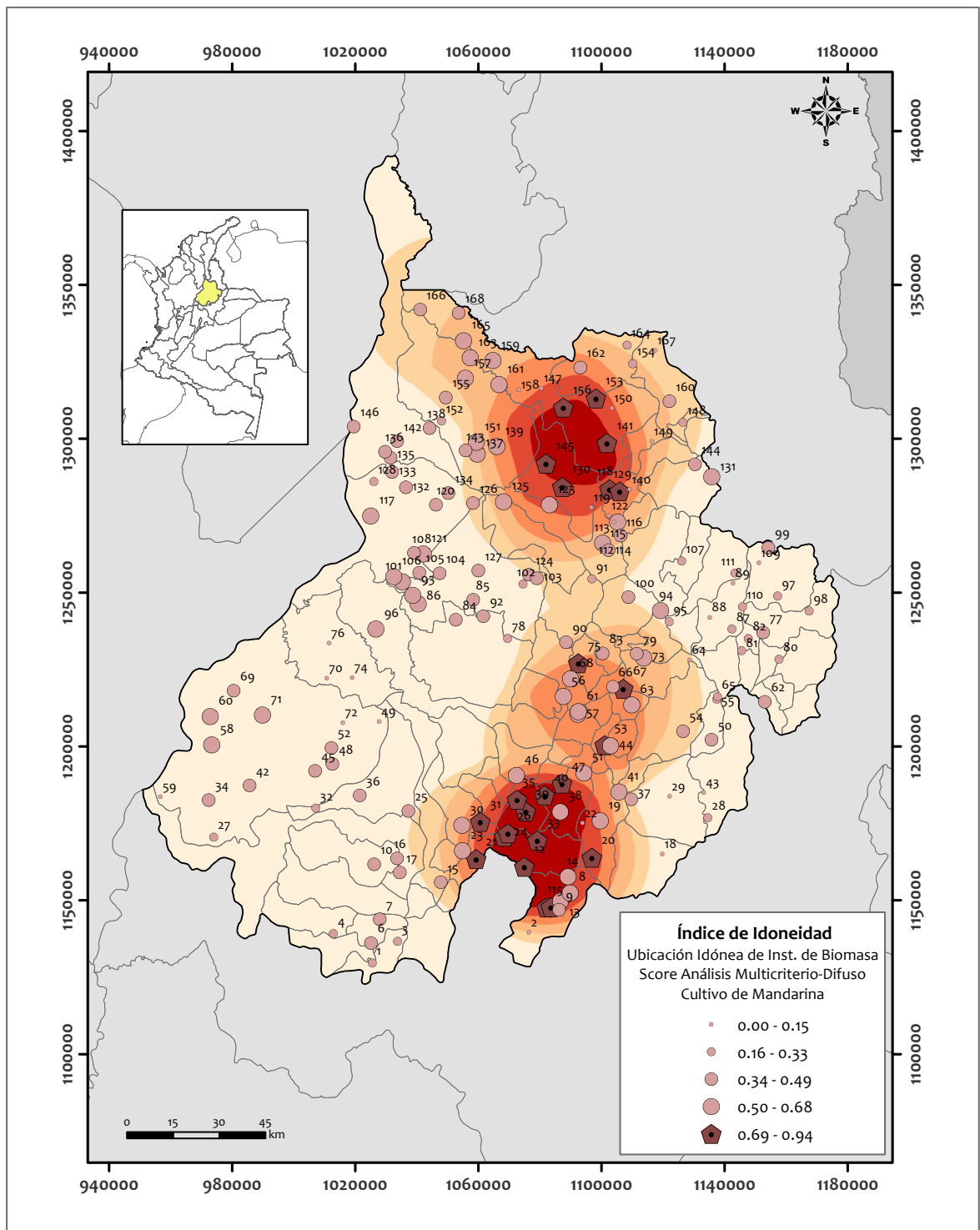


Figura E.14: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Mandarina

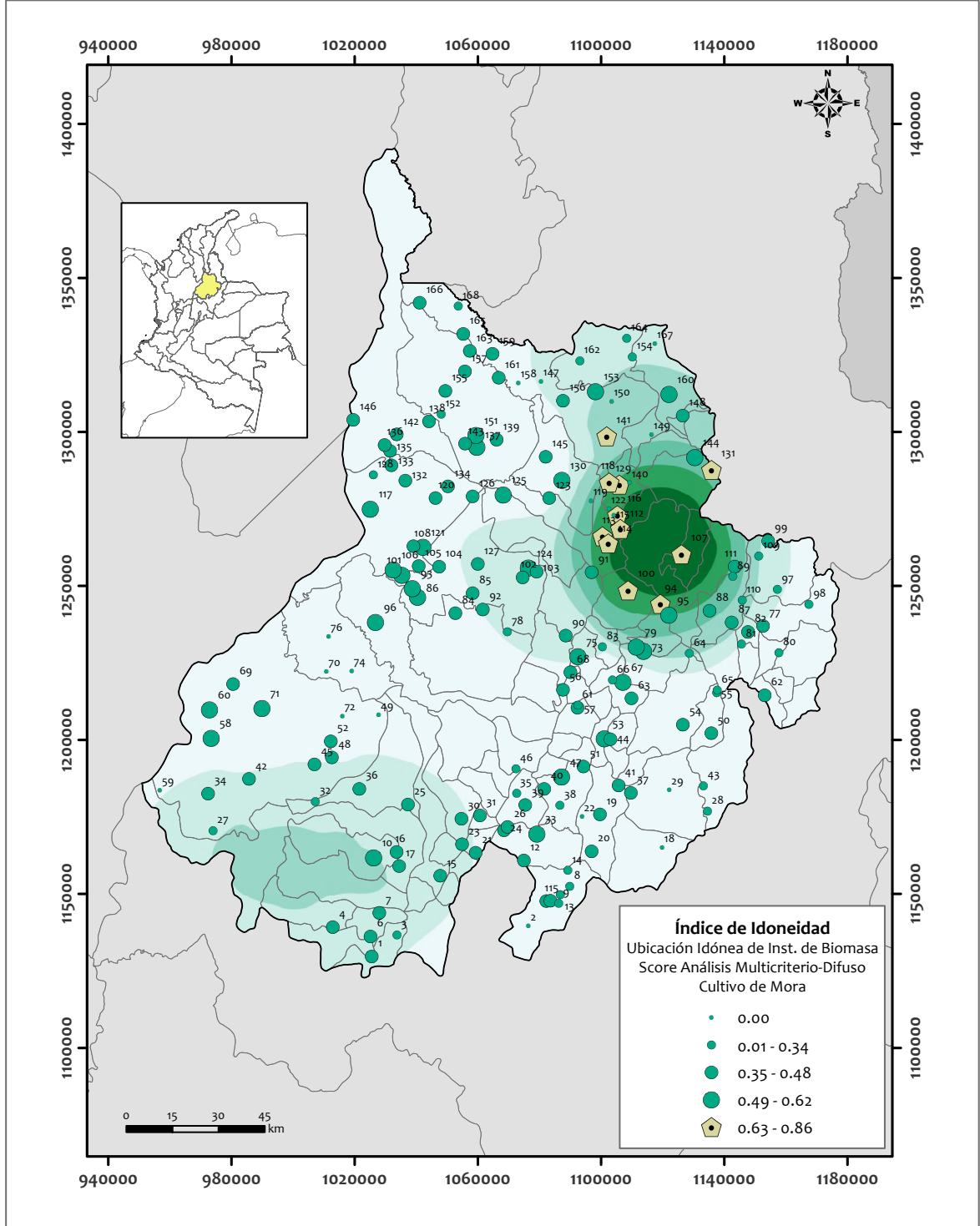


Figura E.15: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Mora

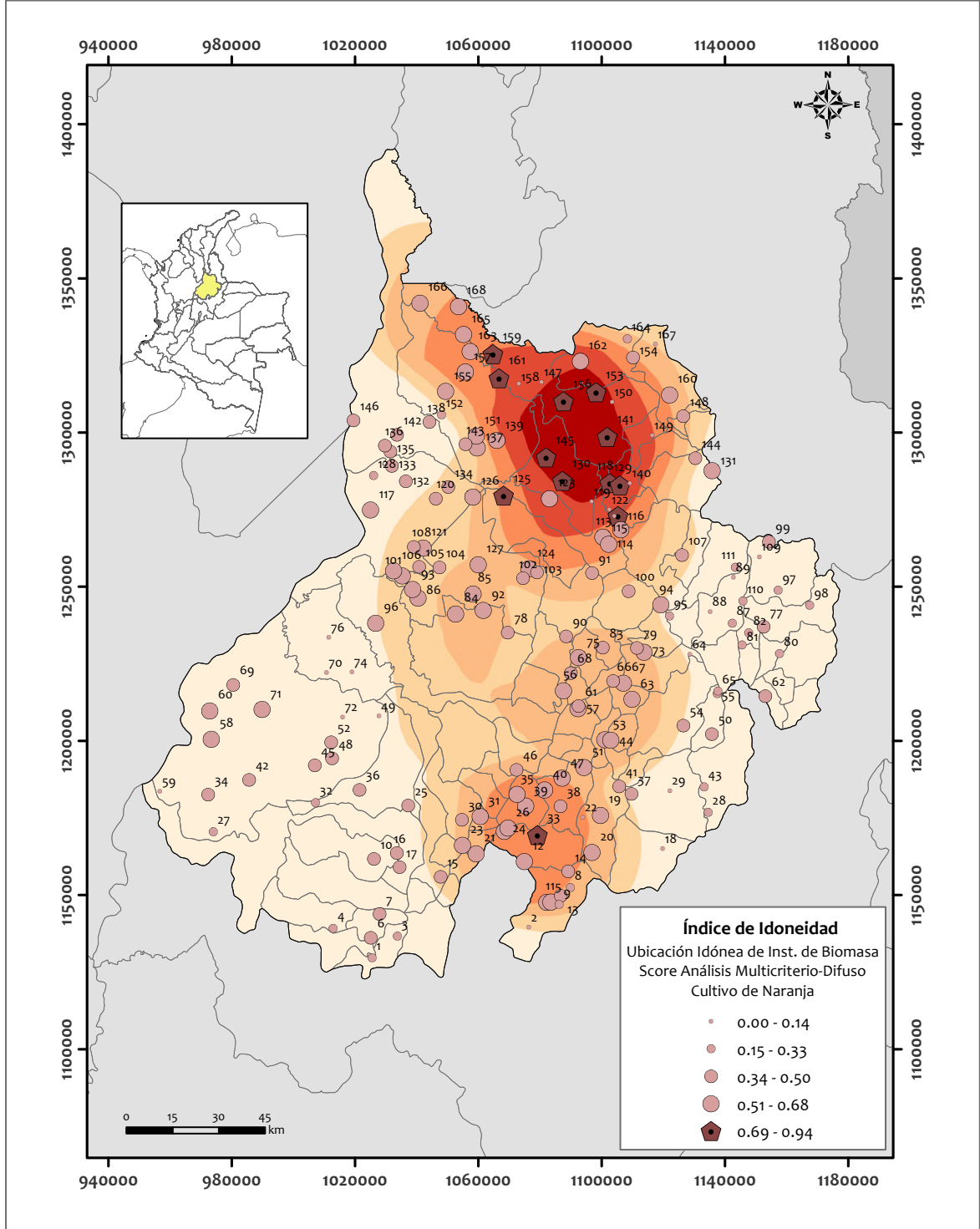


Figura E.16: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Naranja

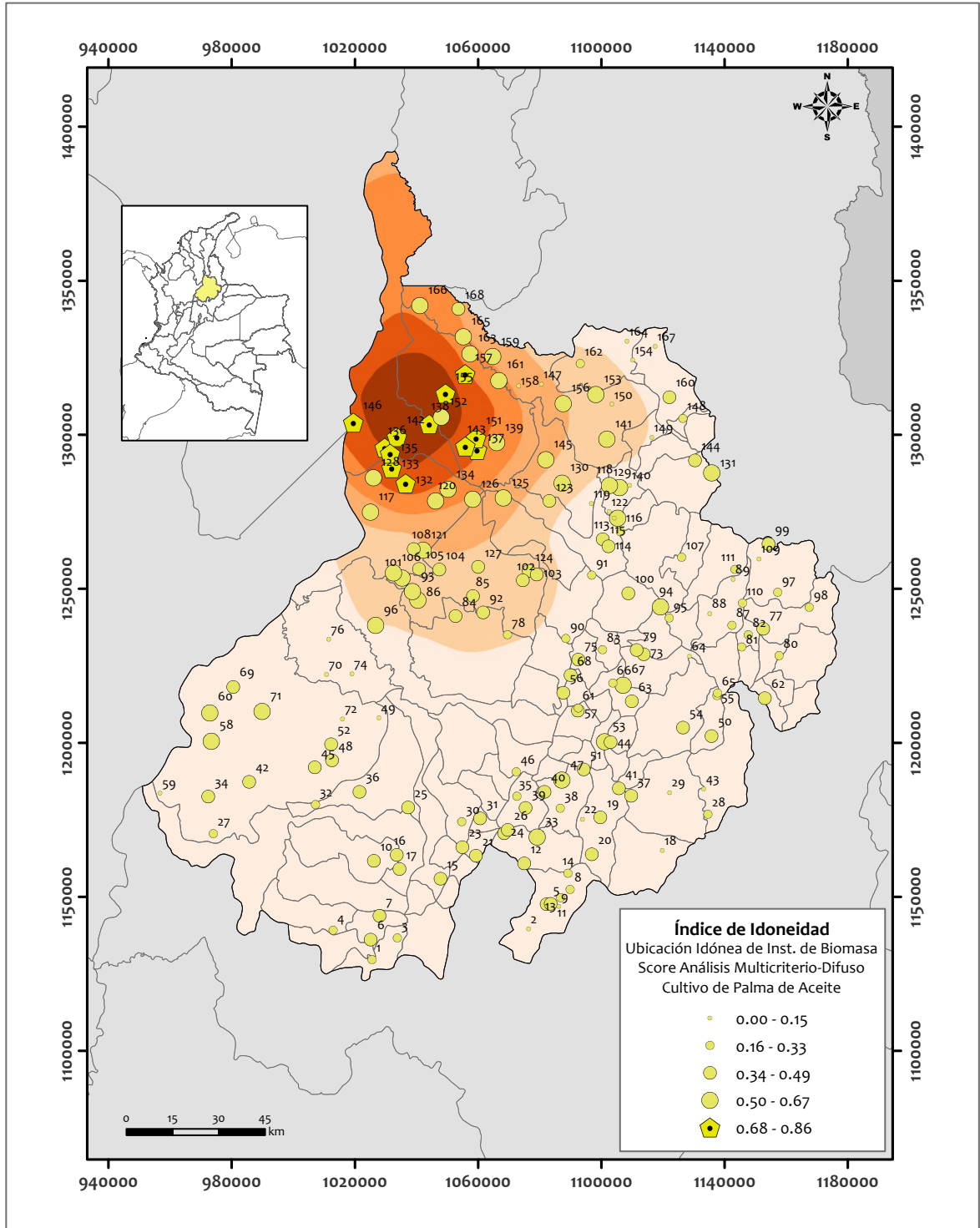


Figura E.17: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Palma de Aceite

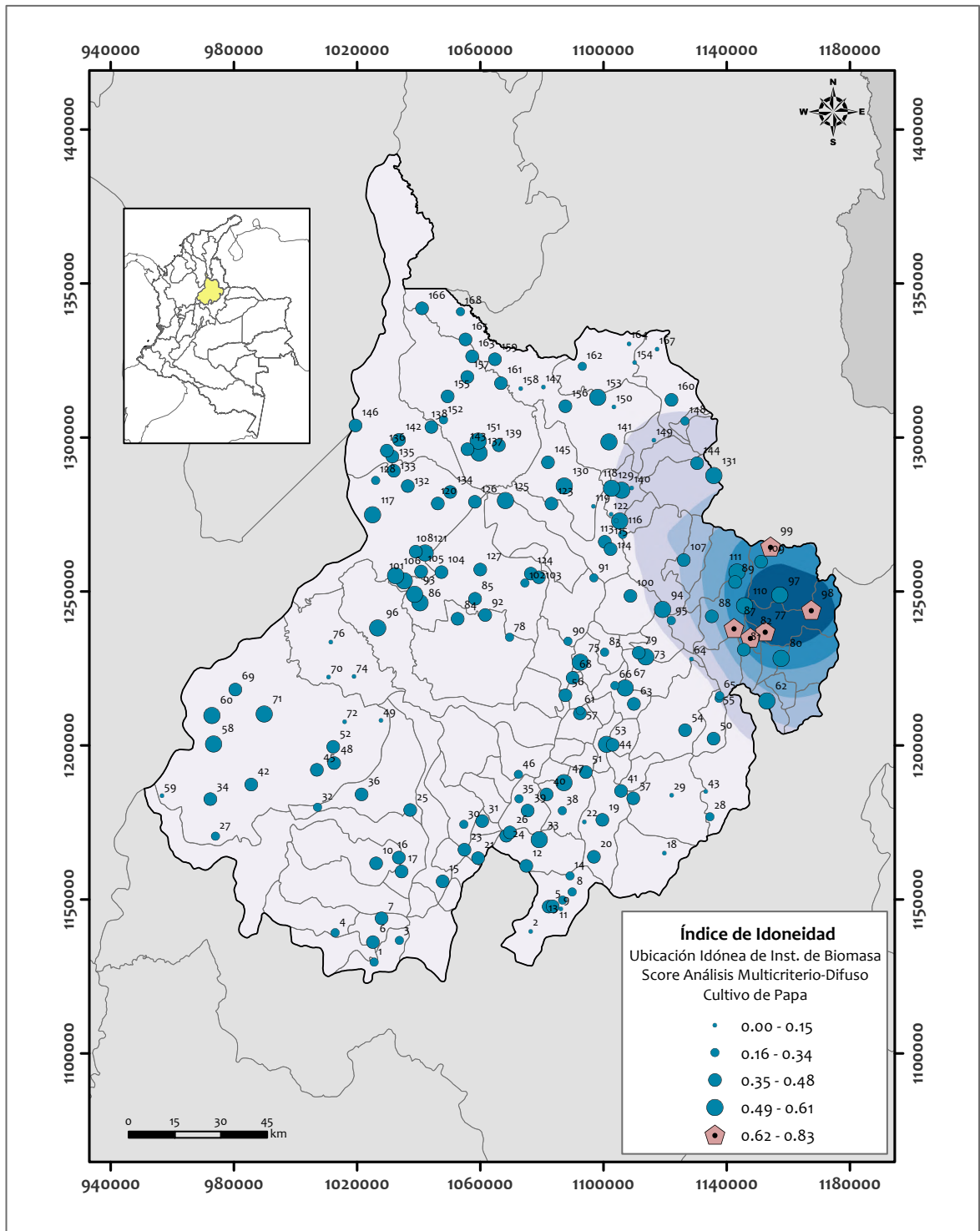


Figura E.18: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Papa

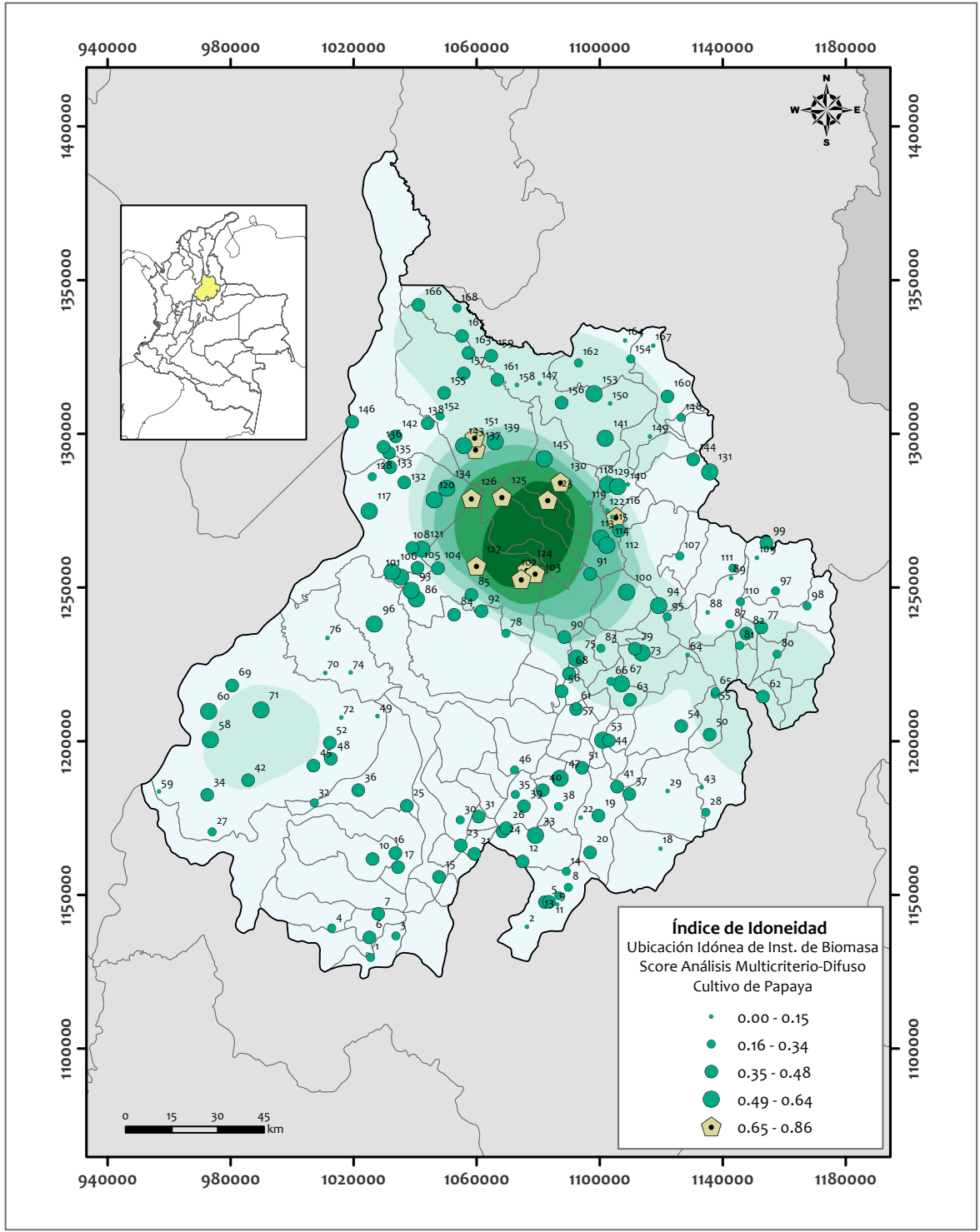


Figura E.19: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Papaya

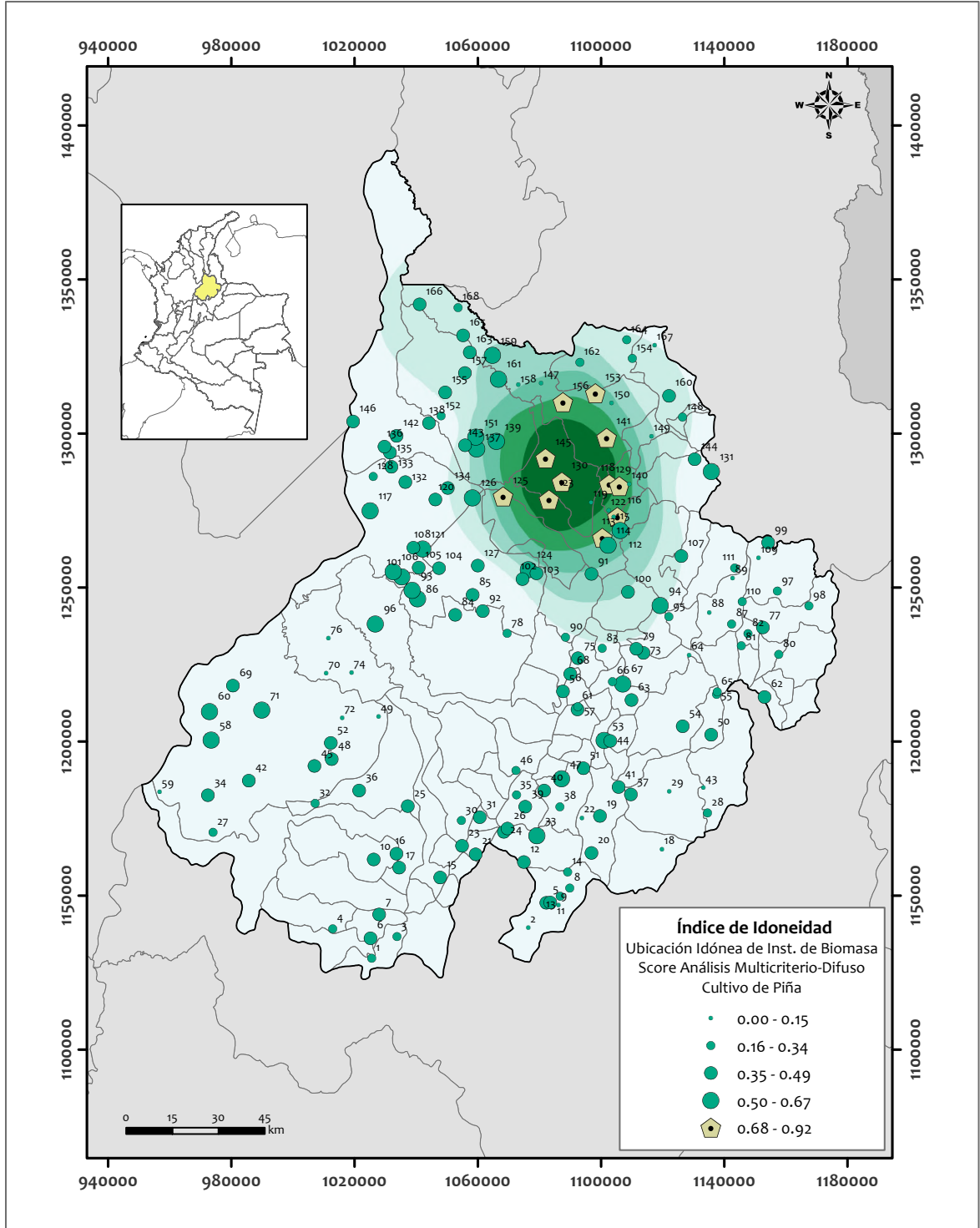


Figura E.20: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Piña

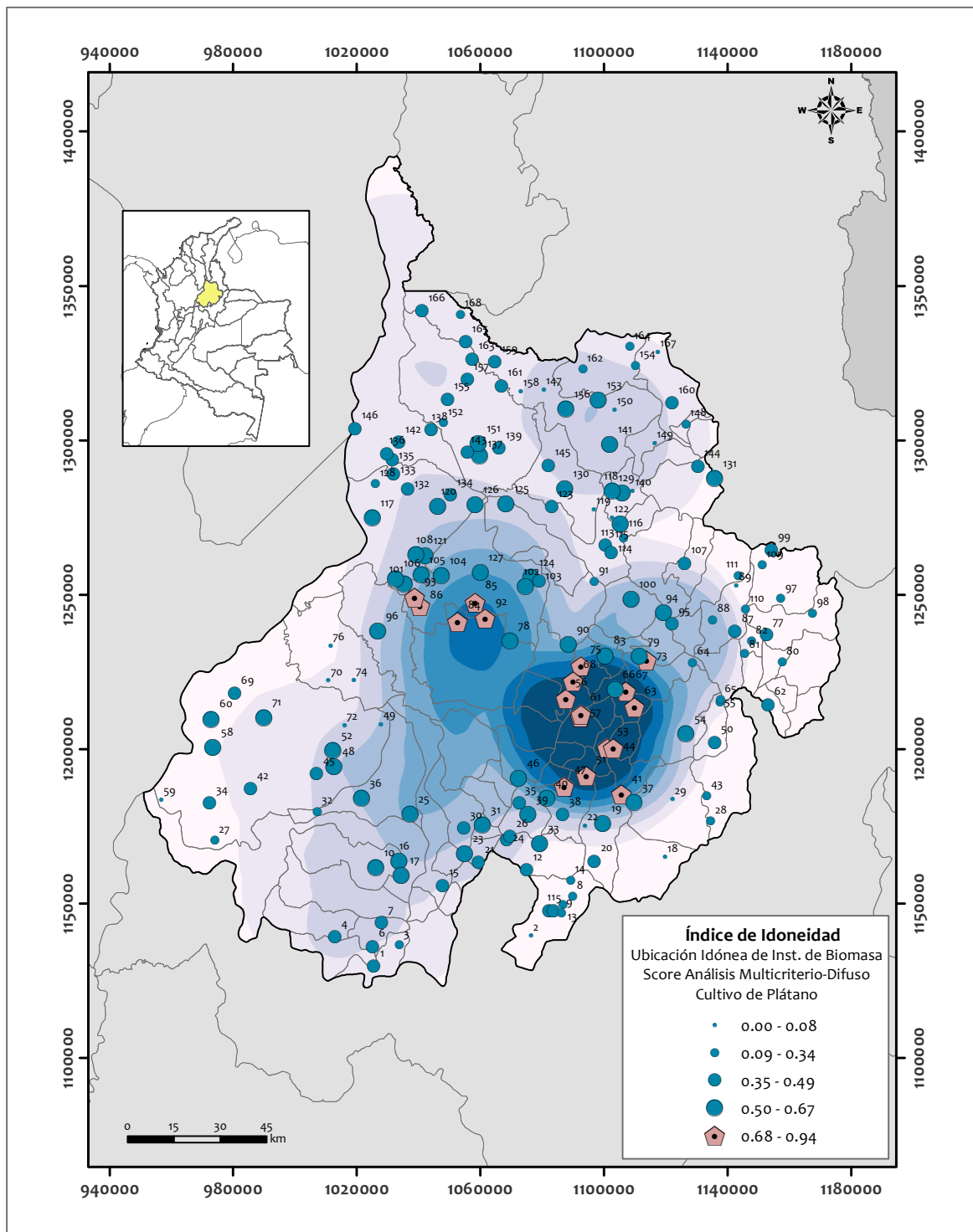


Figura E.21: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Plátano

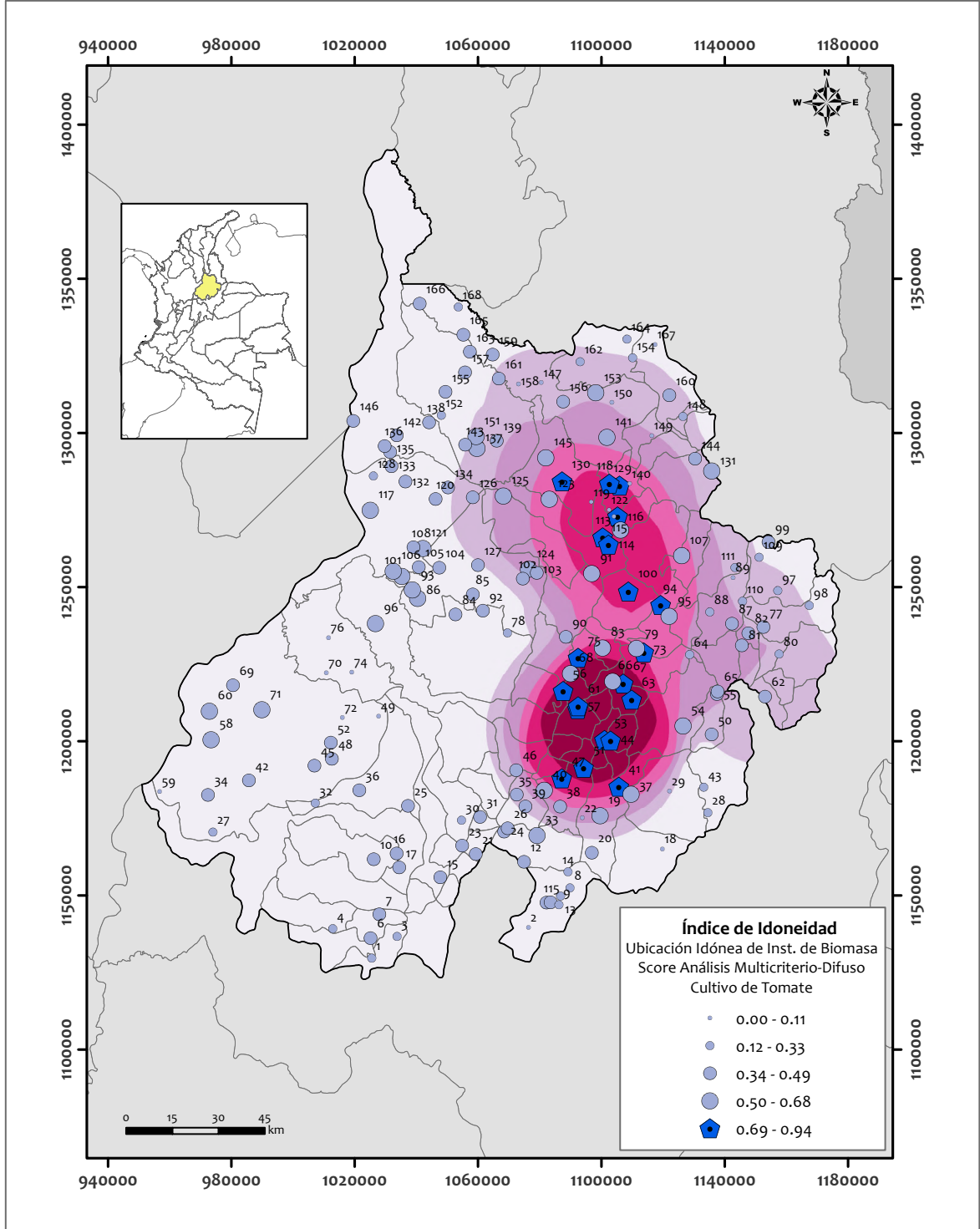


Figura E.22: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Tomate

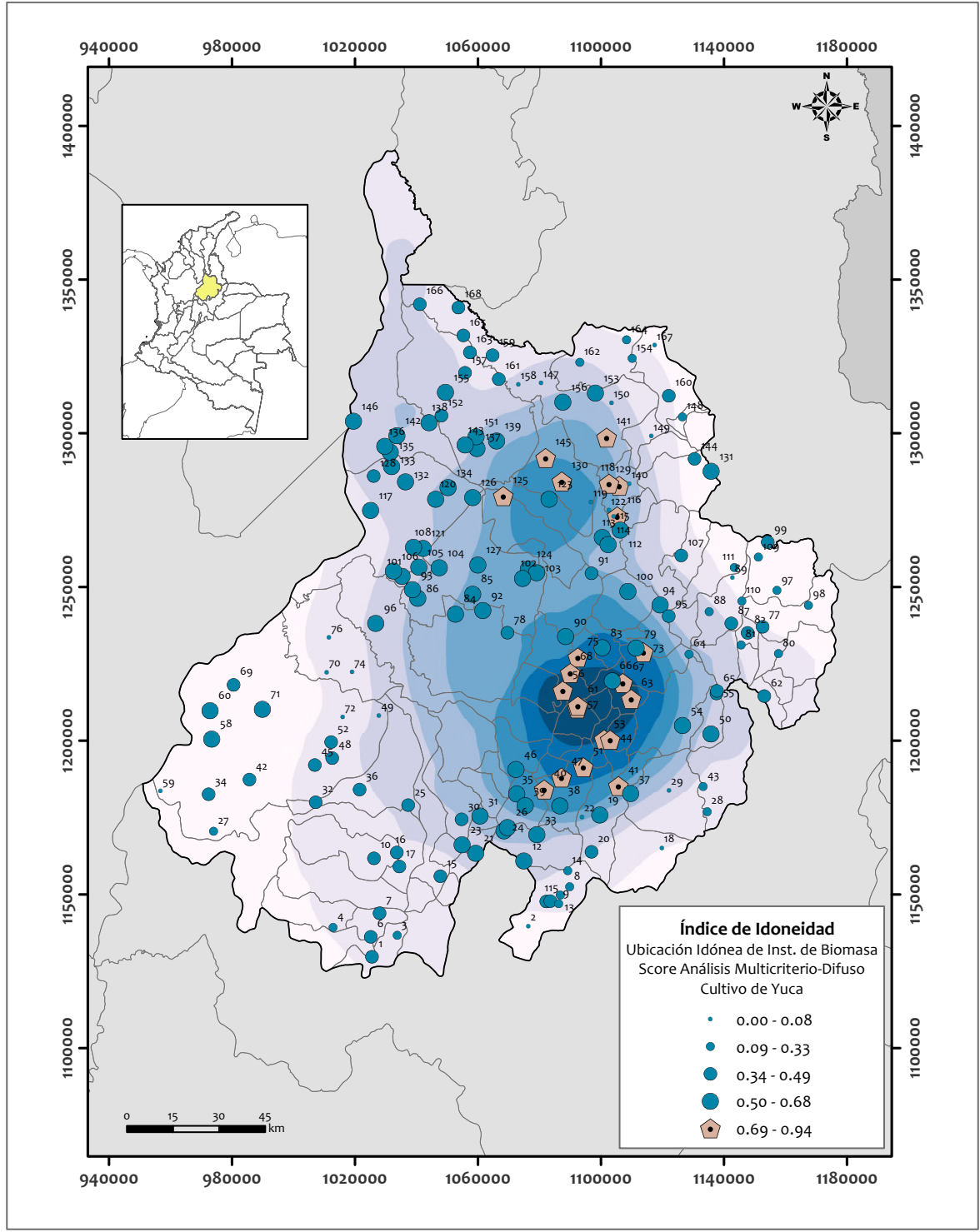


Figura E.23: Mapa de clasificación de sitios de candidatos para localizar una planta de bioenergía a base de residuos de Yuca